

# Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/JP04/018509

International filing date: 10 December 2004 (10.12.2004)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: JP  
Number: 2004-014746  
Filing date: 22 January 2004 (22.01.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 10 February 2005 (10.02.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland  
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

14.12.2004

日 本 国 特 許 庁  
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日                      2 0 0 4 年    1 月 2 2 日  
Date of Application:

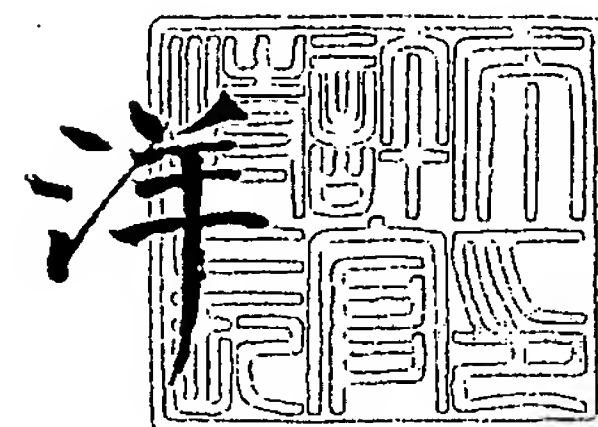
出 願 番 号                      特 願 2 0 0 4 - 0 1 4 7 4 6  
Application Number:  
[ST. 10/C] :                      [ J P 2 0 0 4 - 0 1 4 7 4 6 ]

出      願      人                      松 下 電 器 産 業 株 式 会 社  
Applicant(s):

2 0 0 5 年    1 月 2 8 日

特 許 庁 長 官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

小 川



【書類名】 特許願  
【整理番号】 2047750005  
【提出日】 平成16年 1月22日  
【あて先】 特許庁長官殿  
【国際特許分類】 G01R 15/04  
【発明者】  
    【住所又は居所】 大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地 松下電器産業株式会社内  
    【氏名】 浜田 英伸  
【特許出願人】  
    【識別番号】 000005821  
    【氏名又は名称】 松下電器産業株式会社  
【代理人】  
    【識別番号】 100092794  
    【弁理士】  
    【氏名又は名称】 松田 正道  
    【電話番号】 06-6397-2840  
【手数料の表示】  
    【予納台帳番号】 009896  
    【納付金額】 21,000円  
【提出物件の目録】  
    【物件名】 特許請求の範囲 1  
    【物件名】 明細書 1  
    【物件名】 図面 1  
    【物件名】 要約書 1  
    【包括委任状番号】 9006027

## 【書類名】 特許請求の範囲

## 【請求項 1】

入射される光の光軸の方向に垂直な第一の方向に関して、前記光軸から両方向に向かって減少する屈折率の分布を有する第一の材料と、前記第一の材料の中に、前記第一の方向とは異なる第二の方向に関して、実質的に周期的に配置された第二の材料とを有するフォトニック結晶を備えた光デバイスであって、

(a) 前記第一の材料が有する前記第一の方向に関する屈折率の分布と、(b) 前記フォトニック結晶が有する前記第一の方向に関する厚さと、(c) 前記入射される光の波長と、(d) 前記入射される光の、前記光が入射される前記フォトニック結晶の光入射端部の内側における、前記第一の方向に関するビームスポット半径とは、前記入射される光が前記第一の方向に関して前記フォトニック結晶の内部に実質上閉じ込められるように決定されている光デバイス。

## 【請求項 2】

前記フォトニック結晶は、膜形状を有し、

前記第一の方向は、前記膜形状の膜厚の方向であり、

前記第二の方向は、前記膜形状の膜面に平行な方向である請求項 1 記載の光デバイス。

## 【請求項 3】

前記第一の材料が有する前記膜厚の方向に関する屈折率の分布は、前記フォトニック結晶が有する前記膜厚の方向に関する厚さ  $W$  と、前記入射される光の波長  $\lambda$  と、前記入射される光の、前記光入射端部の内側における、前記膜厚の方向に関するビームスポット半径  $\omega_1$  とに基づいて決定される所定の分布関数よりも大きな急峻性を有する請求項 2 記載の光デバイス。

## 【請求項 4】

前記所定の分布関数は、前記光軸を基準とする前記膜厚の方向に関する座標  $y$  についての、屈折率分布定数  $g$ 、および最大値  $n_1$  を有する二次関数

## 【数 1】

$$n(y) = n_1 \left( 1 - \frac{g^2 y^2}{2} \right)$$

で実質的に与えられる請求項 3 記載の光デバイス。

## 【請求項 5】

前記所定の分布関数は、前記光軸を基準とする前記膜厚の方向に関する座標  $y$  についての、屈折率分布定数  $g$ 、平坦部分定数  $a$ 、および最大値  $n_1$  を有する関数

## 【数 2】

$$n'(y) = \begin{cases} n_1 \left\{ 1 - \frac{g^2 (y+a)^2}{2} \right\} & (y \leq -a) \\ n_1 & (-a \leq y \leq a) \\ n_1 \left\{ 1 - \frac{g^2 (y-a)^2}{2} \right\} & (a \leq y) \end{cases}$$

で実質的に与えられる請求項 3 記載の光デバイス。

## 【請求項 6】

前記屈折率分布定数  $g$  は、

【数 3】

$$g \geq \frac{2\lambda}{\pi\omega_1 W}$$

を実質的に満足する請求項 4 または 5 記載の光デバイス。

【請求項 7】

前記入射される光の波面の前記光入射端部における曲率半径は、実質的に無限大である請求 6 記載の光デバイス。

【請求項 8】

前記ビームスポット半径  $\omega_1$  は、前記厚さ  $W$  の実質的に半分である請求 7 記載の光デバイス。

【請求項 9】

前記膜厚は、所定の箇所において変化している請求項 7 記載の光デバイス。

【請求項 10】

前記第一の材料が有する前記膜厚の方向に関する屈折率の分布と、前記フォトニック結晶が有する前記膜厚の方向に関する厚さ  $W$  と、前記入射される光の波長  $\lambda$  と、前記入射される光の、前記光入射端部の内側における、前記膜厚の方向に関するビームスポット半径  $\omega_1$  とは、前記入射される光が前記所定の箇所においては前記膜厚の方向に関して前記フォトニック結晶の外部に漏れるように決定されている請求項 9 記載の光デバイス。

【請求項 11】

前記第二の材料の実質的に周期的な配置は、所定の箇所において変化している請求項 7 記載の光デバイス。

【請求項 12】

前記所定の箇所は、前記入射される光の、前記フォトニック結晶の内側における、前記膜厚の方向に関するビームスポット半径が極大値または極小値をとる箇所である請求項 11 記載の光デバイス。

【請求項 13】

前記所定の箇所は、前記光入射端部から前記光が出射される前記フォトニック結晶の光出射端部まで連続した、前記第二の材料が実質的に配置されていない箇所である請求項 11 記載の光デバイス。

【請求項 14】

前記第二の材料は、前記膜厚の方向に延びた空孔を利用して配置された空気である請求項 7 記載の光デバイス。

【請求項 15】

前記フォトニック結晶を保持する基板をさらに備え、

前記空孔は、前記基板の側に延びている請求項 14 記載の光デバイス。

【請求項 16】

前記入射される光を、前記光入射端部に誘導するための誘導部をさらに備えた請求項 15 記載の光デバイス。

【請求項 17】

前記誘導部は、前記入射される光を、その波面の前記光入射端部における曲率半径が実質的に無限大となるように変換する請求項 16 記載の光デバイス。

【請求項 18】

前記誘導部は、前記入射される光を、ビームウェストが前記光入射端部において形成されるように変換する請求項 16 記載の光デバイス。

【請求項 19】

前記誘導部は、前記入射される光を、その前記光入射端部の内側における前記第一の方

向に関するビームスポット半径が実質的に前記フォトニック結晶が有する前記第一の方向に関する厚さの半分となるように変換する請求項 1 6 記載の光デバイス。

【請求項 2 0】

入射される光の光軸の方向に垂直な第一の方向に関して、前記光軸から両方向に向かって減少する屈折率の分布を有する第一の材料と、前記第一の材料の中に、前記第一の方向とは異なる第二の方向に関して、実質的に周期的に配置された第二の材料とを有するフォトニック結晶を備えた光デバイスの製造方法であって、

(a) 前記第一の材料が有する前記第一の方向に関する屈折率の分布と、(b) 前記フォトニック結晶が有する前記第一の方向に関する厚さと、(c) 前記入射される光の波長と、(d) 前記入射される光の、前記光が入射される前記フォトニック結晶の光入射端部の内側における、前記第一の方向に関するビームスポット半径とを、前記入射される光が前記第一の方向に関して前記フォトニック結晶の内部に実質上閉じ込められるように決定する決定ステップを備えた光デバイスの製造方法。



【書類名】明細書

【発明の名称】光デバイス、および光デバイスの製造方法

【技術分野】

【0001】

本発明は、たとえば、フィルタ、プリズム、導波路、および光平面回路などに使用されるフォトリソグラフィ結晶スラブを利用した、光デバイス、および光デバイスの製造方法に関する。

【背景技術】

【0002】

従来のフォトリソグラフィ結晶スラブは、屈折率が一定のスラブ（屈折率 $=n_2$ ）中に複数の柱状部分（屈折率 $=n_1$ ）を二次元周期的に配列した二次元フォトリソグラフィ結晶と、二次元フォトリソグラフィ結晶を膜厚方向に挟み込む、 $n_1$ 、 $n_2$ よりも低い屈折率を有する下部クラッドおよび上部クラッド（屈折率 $=n_3$ ）と、基板とで構成されている。

【0003】

(1) フォトリソグラフィ結晶スラブ中を伝搬する光は、二次元フォトリソグラフィ結晶の如何なる部分の屈折率よりも低い上下クラッドとの境界で全反射により上下方向に閉じ込められる（例えば、特許文献1参照）。

【0004】

(2) また、二次元および三次元フォトリソグラフィ結晶において、周期長や周期性の方向を、結晶中の位置に関して徐々にまたは階段状に変化させるものもある（例えば、特許文献2参照）。

【特許文献1】特開2001-337236（たとえば、第1図）

【特許文献2】特開2001-91701（たとえば、第1図）

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

(1) しかしながら、前者においては、二次元周期的に配置する柱状材料部分（屈折率 $=n_1$ ）と柱状部分以外（屈折率 $=n_2$ ）とクラッド部分（屈折率 $=n_3$ ）の間で $n_1 \neq n_2$ 、 $n_1 > n_3$ 、 $n_2 > n_3$ の関係を満足する材料を選択する必要がある。そして、膜厚方向の光の漏れの低減には、 $n_1$ と $n_3$ との屈折率差および $n_2$ と $n_3$ との屈折率差は大きい方が良い。また、フォトリソグラフィ結晶を構成するには $n_1$ と $n_2$ との屈折率差もできるだけ大きくする必要がある。

【0006】

このため、材料の組合せは限られる。

【0007】

例えば、クラッドに屈折率が最も低い空気（屈折率 $=1$ ）を選択した場合、フォトリソグラフィ結晶部分は、高屈折率材料（例えば、屈折率 $=3$ 以上の半導体材料）と低屈折率材料（例えば、樹脂・ガラス・空気など）とを組合せることになる。これで、フォトリソグラフィ結晶としての最低限の屈折率差を確保できる（低屈折率材料を空気にすればフォトリソグラフィバンドギャップは得られるが、厳密には $n_1 > n_3$ を満足しない）。

【0008】

ところが、クラッドを空気にするエアーブリッジ構造は、フォトリソグラフィ結晶を空中に浮かせる必要があり、取扱が困難であることがある。

【0009】

また、クラッドを固体の最低屈折率材料であるフッ素化合物（屈折率 $\approx 1.3$ ）とした場合、フォトリソグラフィ結晶部分の低屈折率材料として高屈折率材料の屈折率に近い半導体材料を用いると、フォトリソグラフィ結晶としての機能が限定され、一方、フォトリソグラフィ結晶部分の低屈折率材料として樹脂やガラスなどの屈折率が2以下の材料を用いると、クラッドとの屈折率差が小さくなり膜厚方向の光の閉じ込めが弱くなる（特に膜厚が $5\mu\text{m}$ 以下の二次元フォトリソグラフィ結晶の場合、回折が大きいのでほとんど漏れる）。

## 【0010】

(2) また、後者においては、長周期フォトニック結晶部分のコアと、コアを取り囲む短周期フォトニック結晶のクラッドとを利用し、周期制御によって周囲方向に位相速度を早くすることで光を相対的に位相速度の遅いコアに閉じ込める。

## 【0011】

この方法は、周期を制御することで伝搬モードフィールド状態を自由に制御できるので、デバイス設計の上で非常にメリットが大きい。また、コアやクラッドが固体で構成されるので、ハンドリングが良く実用的である。

## 【0012】

しかし、周期を変調する方法は、製造プロセスにおいて高度な管理が必要である上、製造装置が特殊になってしまう。

## 【0013】

本発明は、上記従来のこのような課題を考慮し、たとえば、より簡単な光学系でフォトニック結晶の周期を有さない方向に対して光を閉じ込めることができる光デバイス、および光デバイスの製造方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

## 【0014】

第1の本発明は、入射される光の光軸の方向に垂直な第一の方向に関して、前記光軸から両方向に向かって減少する屈折率の分布を有する第一の材料と、前記第一の材料の中に、前記第一の方向とは異なる第二の方向に関して、実質的に周期的に配置された第二の材料とを有するフォトニック結晶を備えた光デバイスであって、

(a) 前記第一の材料が有する前記第一の方向に関する屈折率の分布と、(b) 前記フォトニック結晶が有する前記第一の方向に関する厚さと、(c) 前記入射される光の波長と、(d) 前記入射される光の、前記光が入射される前記フォトニック結晶の光入射端部の内側における、前記第一の方向に関するビームスポット半径とは、前記入射される光が前記第一の方向に関して前記フォトニック結晶の内部に実質上閉じ込められるように決定されている光デバイスである。

## 【0015】

第2の本発明は、前記フォトニック結晶は、膜形状を有し、

前記第一の方向は、前記膜形状の膜厚の方向であり、

前記第二の方向は、前記膜形状の膜面に平行な方向である第1の本発明の光デバイスである。

## 【0016】

第3の本発明は、前記第一の材料が有する前記膜厚の方向に関する屈折率の分布は、前記フォトニック結晶が有する前記膜厚の方向に関する厚さ $W$ と、前記入射される光の波長 $\lambda$ と、前記入射される光の、前記光入射端部の内側における、前記膜厚の方向に関するビームスポット半径 $\omega_1$ とに基づいて決定される所定の分布関数よりも大きな急峻性を有する第2の本発明の光デバイスである。

## 【0017】

第4の本発明は、前記所定の分布関数は、前記光軸を基準とする前記膜厚の方向に関する座標 $y$ についての、屈折率分布定数 $g$ 、および最大値 $n_1$ を有する二次関数

## 【0018】

【数1】

$$n(y) = n_1 \left( 1 - \frac{g^2 y^2}{2} \right)$$

## 【0019】



で実質的に与えられる第3の本発明の光デバイスである。

【0020】

第5の本発明は、前記所定の分布関数は、前記光軸を基準とする前記膜厚の方向に関する座標  $y$  についての、屈折率分布定数  $g$ 、平坦部分定数  $a$ 、および最大値  $n_1$  を有する関数

【0021】

【数2】

$$n'(y) = \begin{cases} n_1 \left\{ 1 - \frac{g^2 (y+a)^2}{2} \right\} & (y \leq -a) \\ n_1 & (-a \leq y \leq a) \\ n_1 \left\{ 1 - \frac{g^2 (y-a)^2}{2} \right\} & (a \leq y) \end{cases}$$

【0022】

で実質的に与えられる第3の本発明の光デバイスである。

【0023】

第6の本発明は、前記屈折率分布定数  $g$  は、

【0024】

【数3】

$$g \geq \frac{2\lambda}{\pi \omega_1 W}$$

【0025】

を実質的に満足する第4または第5の本発明の光デバイスである。

【0026】

第7の本発明は、前記入射される光の波面の前記光入射端部における曲率半径は、実質的に無限大である第6の本発明の光デバイスである。

【0027】

第8の本発明は、前記ビームスポット半径  $\omega_1$  は、前記厚さ  $W$  の実質的に半分である第7の本発明の光デバイスである。

【0028】

第9の本発明は、前記膜厚は、所定の箇所において変化している第7の本発明の光デバイスである。

【0029】

第10の本発明は、前記第一の材料が有する前記膜厚の方向に関する屈折率の分布と、前記フォトニック結晶が有する前記膜厚の方向に関する厚さ  $W$  と、前記入射される光の波長  $\lambda$  と、前記入射される光の、前記光入射端部の内側における、前記膜厚の方向に関するビームスポット半径  $\omega_1$  とは、前記入射される光が前記所定の箇所においては前記膜厚の方向に関して前記フォトニック結晶の外部に漏れるように決定されている第9の本発明の光デバイスである。

【0030】

第11の本発明は、前記第二の材料の実質的に周期的な配置は、所定の箇所において変

化している第 7 の本発明の光デバイスである。

【0031】

第 12 の本発明は、前記所定の箇所は、前記入射される光の、前記フォトニック結晶の内側における、前記膜厚の方向に関するビームスポット半径が極大値または極小値をとる箇所である第 11 の本発明の光デバイスである。

【0032】

第 13 の本発明は、前記所定の箇所は、前記光入射端部から前記光が出射される前記フォトニック結晶の光出射端部まで連続した、前記第二の材料が実質的に配置されていない箇所である第 11 の本発明の光デバイスである。

【0033】

第 14 の本発明は、前記第二の材料は、前記膜厚の方向に延びた空孔を利用して配置された空気である第 7 の本発明の光デバイスである。

【0034】

第 15 の本発明は、前記フォトニック結晶を保持する基板をさらに備え、前記空孔は、前記基板の側に延びている第 14 の本発明の光デバイスである。

【0035】

第 16 の本発明は、前記入射される光を、前記光入射端部に誘導するための誘導部をさらに備えた第 1 の本発明の光デバイスである。

【0036】

第 17 の本発明は、前記誘導部は、前記入射される光を、その波面の前記光入射端部における曲率半径が実質的に無限大となるように変換する第 16 の本発明の光デバイスである。

【0037】

第 18 の本発明は、前記誘導部は、前記入射される光を、ビームウェストが前記光入射端部において形成されるように変換する第 16 の本発明の光デバイスである。

【0038】

第 19 の本発明は、前記誘導部は、前記入射される光を、その前記光入射端部の内側における前記第一の方向に関するビームスポット半径が実質的に前記フォトニック結晶が有する前記第一の方向に関する厚さの半分となるように変換する第 16 の本発明の光デバイスである。

【0039】

第 20 の本発明は、入射される光の光軸の方向に垂直な第一の方向に関して、前記光軸から両方向に向かって減少する屈折率の分布を有する第一の材料と、前記第一の材料の中に、前記第一の方向とは異なる第二の方向に関して、実質的に周期的に配置された第二の材料とを有するフォトニック結晶を備えた光デバイスの製造方法であって、

(a) 前記第一の材料が有する前記第一の方向に関する屈折率の分布と、(b) 前記フォトニック結晶が有する前記第一の方向に関する厚さと、(c) 前記入射される光の波長と、(d) 前記入射される光の、前記光が入射される前記フォトニック結晶の光入射端部の内側における、前記第一の方向に関するビームスポット半径とを、前記入射される光が前記第一の方向に関して前記フォトニック結晶の内部に実質上閉じ込められるように決定する決定ステップを備えた光デバイスの製造方法である。

【発明の効果】

【0040】

以上述べたことから明らかなように、本発明は、たとえば、より簡単な光学系でフォトニック結晶の周期を有さない方向に対して光を閉じ込めることができるという効果を有するものである。

【発明を実施するための最良の形態】

【0041】

以下、本発明の実施の形態を、図面を参照しながら説明する。

【0042】

(実施の形態 1)

はじめに、図 1, 2 を主として参照しながら、本実施の形態の光デバイスの原理について説明する。

【0043】

ここに、図 1 は、膜厚方向において中心付近で極大となり、中心からの距離に従ってほぼ放物線状に屈折率が低下する屈折率分布を有する G I 型フォトリック結晶スラブの膜厚方向と伝搬方向とを含む断面 1 3 (図 2 参照) の概要図である。また、図 2 は、断面 1 3 の位置を示す G I 型フォトリック結晶スラブの斜視図である。

【0044】

なお、ビームスポット軌跡 4 1 は、入射側導波路 5 と G I 型フォトリック結晶スラブ 4 との境界部分や、G I 型フォトリック結晶スラブ 4 と空孔 2 との境界部分で不連続に変化する。しかし、その不連続性の程度は小さいので、ビームスポット軌跡 4 1 を連続的に図示した (以下同様)。

【0045】

また、入射端 9 の G I 型フォトリック結晶スラブ内側での入射端スポット半径  $\omega_1$  は、G I 型フォトリック結晶スラブ内ビームスポット半径  $\omega_2$  の最大値  $\omega_{2max}$  以下である。しかし、入射端でのビームの波面の曲率半径が無限大である場合 (以下において主として考察される場合) にはこれらが一致するので、この場合を図示した (以下同様)。

【0046】

本実施の形態では、半導体プロセスや成型プロセスで加工しやすいスラブ中に所定の柱状材料を二次元周期的に形成する G I 型フォトリック結晶スラブ 4 において、膜厚に垂直な方向はフォトリック結晶の特性で光を制御する方法を利用し、膜厚方向の光の閉じ込めにはクラッドの屈折率に依存しない方法を利用する。

【0047】

より具体的に述べると、本実施の形態の光デバイスは、膜厚方向において屈折率の極大 (最大) 部分から離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を有する G I (G r a d e d - I n d e x) 型スラブ 4 中の膜厚方向に垂直な二次元方向に、所定の屈折率を周期的に配置した G I 型フォトリック結晶スラブ 4 と、G I 型フォトリック結晶スラブ 4 へ光を入射させる入力部としての入射側導波路 5 とを備えている。

【0048】

そして、G I 型フォトリック結晶スラブ 4 は、その入射端 9 の G I 型フォトリック結晶スラブ内側での入射端スポット半径  $\omega_1$  と、波長  $\lambda$  と、G I 型スラブ 1 の膜厚方向の屈折率分布形状とで一義的に決まる G I 型フォトリック結晶スラブ内ビームスポット半径  $\omega_2$  の 2 倍以上の膜厚  $W$  を有する。

【0049】

このように、フォトリック結晶の周期方向以外の方向に屈折率の極大部分から離れるに従って屈折率が増加しない特定の条件を満足する屈折率分布を設けることで、回折効果で光が漏れる方向において光を閉じ込めることができる。

【0050】

また、屈折率分布の形状を操作することで、フォトリック結晶の周期を有しない方向の大きさを任意に変化させることができる。

【0051】

屈折率分布の形状を操作をとともう、このようなフォトリック結晶の製造方法については、本実施の形態の最後において説明を行う。

【0052】

なお、G I 型フォトリック結晶スラブ 4 は本発明のフォトリック結晶に対応し、本実施の形態の光デバイスは本発明の光デバイスに対応する。

【0053】

つぎに、本実施の形態の光デバイスの構成および動作について、より詳細に説明する。

【0054】

本実施の形態の光デバイスは、基板 3 と、G I 型フォトニック結晶スラブ 4 の入射端 9 に結合されたコア屈折率  $n_0$  の入射側導波路 5 とを備えている。

【0055】

また、本実施の形態の光デバイスは、膜厚方向に当たる  $y$  方向のほぼ中心で極大値  $n_1$  を有し、 $y = 0$  に当たる光軸（屈折率極大位置）20 からの距離  $y$  に関してほぼ

【0056】

【数 1】

$$n(y) = n_1 \left( 1 - \frac{g^2 y^2}{2} \right)$$

【0057】

の屈折率分布 12 に沿って低下する屈折率分布を有する G I 型スラブ 1 の  $y$  方向に垂直な光伝搬方向に当たる  $z$  方向と幅方向に当たる  $x$  方向とに関して二次元周期的に配列され、 $y$  方向に伸びる複数の空孔 2 を形成した G I 型フォトニック結晶スラブ 4 を備えている。

【0058】

ここに、屈折率分布定数  $g$  に関して、

【0059】

【数 3】

$$g \geq \frac{2\lambda}{\pi \omega_1 W}$$

【0060】

が成立する。ただし、 $W$  は G I 型スラブ 1 の膜厚、 $\omega_1$  は入射端 9 の G I 型フォトニック結晶スラブ内側でのビームスポット半径、 $\lambda$  は波長である。

【0061】

なお、基板 3 は、G I 型フォトニック結晶スラブ 4 の強度を補強するためのもので、光の閉じ込めには何ら寄与していないので、除去しても問題無い。

【0062】

このように、特定の屈折率変化以上の変化をつけることにより、光軸 20 から離れるほど位相速度をより早くできるので、光の漏れの原因となる回折を抑制することができる。

【0063】

次に、G I 型フォトニック結晶スラブ 4 の膜厚方向の光閉じ込めメカニズムについて、より詳細に説明する。

【0064】

G I 型フォトニック結晶スラブ 4 の膜内の光の制御は二次元結晶格子で制御されるので、膜厚方向に当たる  $y$  方向と光伝搬方向に当たる  $z$  方向とを含む断面 13 において  $y$  方向の光の閉じ込めを議論すればよい。ただし、空孔 2 が大きいほど回折による光損失が大きいので、最も空孔 2 の占有率が大きくなる（すなわち、空孔 2 の断面が直径を含む）二次元結晶格子を構成する二次元三角格子の基本格子ベクトル 17 の一つが示す方向を光伝搬方向に当たる  $z$  方向とした。この最も空孔 2 の占有率が大きい場合の光閉じ込め条件は、より空孔の占有率が小さな全ての場合についても有効である。

【0065】

図 1 の断面内のビーム解析は、図 3 に示す GRIN (Graded-Index) レンズ 30 と空気層 31 とを周期的に縦列した 1 次元のレンズ導波路モデルに置き換えることができる。

【0066】

ここに、図3は、GRINレンズを縦列したGI型フォトニック結晶スラブの解析用モデルである。

【0067】

そこで、光線行列を使用したビーム解析により、マックスウェルの方程式をスカラー解析する。

【0068】

長さdを有するGRINレンズ30、および長さ2rを有する空気層31の1個あたりの光線行列は、それぞれ

【0069】

【数4】

$$[Lens(d)] = \begin{bmatrix} \cos gd & \frac{1}{g} \sin gd \\ -g \sin gd & \cos gd \end{bmatrix}$$

【0070】

【数5】

$$[Air(r)] = \begin{bmatrix} 1 & 2r \frac{n_1}{n_0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

【0071】

で表現される。ただし、rは空孔半径、 $n_0$ は前述の通りGI型フォトニック結晶スラブ入射前の材料に当たる光導波路5の屈折率である。

【0072】

従って、GRINレンズ30をn個縦列したGI型フォトニック結晶スラブ内のk番目のGRINレンズ36 ( $k=1, 2, \dots, n$ )の入射端から距離 $z'$ の位置(GI型フォトニック結晶入射端からの距離は $Z=(k-1) \times d + z'$ である)における光線行列は

【0073】

【数6】

$$[GIPC(Z)] = [Lens(z')]([Air(r)][Lens(d)])^{k-1} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$

【0074】

となる。ただし、A, B, C, Dは行列要素とする。

【0075】

このような光線行列に対する、k番目のGRINレンズ36内のビームスポット半径 $\omega_2$ と入射端9でのスポット半径 $\omega_1$ との関係は、

【0076】



【数 7】

$$\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 = \left(A + \frac{B}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{\pi\omega_1^2}\right)^2 B^2$$

【0077】

で表される。ただし、 $R_1$  は入射端でのビームの波面の曲率半径である。

【0078】

A および B は GRIN レンズのレンズ効果と空孔の空間伝搬で構成されるビームの拘束に関し、 $\lambda/\omega_1$  は回折効果によるビームの拡散に関する。したがって、(数 7) における右辺の第 1 項は光の波動性が考慮されない幾何光学的に決まる  $\omega_1$  と  $R_1$  から計算される  $\omega_2$  の成分とに寄与し、同第 2 項は光の波動性が考慮された波動光学的に決まる回折を B で表されるレンズ効果で抑制した  $\omega_2$  の成分に寄与する。

【0079】

したがって、 $\omega_2$  を小さくするためには、幾何光学的には  $\omega_1$  を小さくして  $R_1$  を大きくする方がよく、波動光学的には  $\omega_1$  を大きくして  $\lambda$  を小さくした方がよいことになる。ただし、通常は、フォトニック結晶スラブの膜厚は一般的にシングルモード光ファイバー (SMF) のモードフィールド径 (MFD) の約  $9\mu\text{m}$  よりも小さいので、 $\omega_1$  よりも  $1/\omega_1$  の方がはるかにスポット半径  $\omega_2$  への影響が大きい。

【0080】

なお、ビームスポット半径  $\omega_2$  はガウシアンビームの強度が中心での極大値の  $1/e^2$  ( $e$  は自然対数の底である) となる半径で定義されるので、ビームの全てが GI 型フォトニック結晶スラブの膜厚を超えないと言うわけではない。しかし、ビームスポット半径  $\omega_2$  が膜厚内で変化する限りにおいては、ビームが膜厚から超えることは無い。

【0081】

次に、光閉じ込め条件を、屈折率分布定数  $g$ 、膜厚  $W$ 、空孔半径  $r$  などの GI 型フォトニック結晶スラブの構成要素で表したい。

【0082】

しかしながら、光閉じ込め条件をこれらの構成要素の関係式で表現するのは非常に困難であり、具体的な光閉じ込め条件は計算機を使用した数値解析に頼るのが実用的である。

【0083】

以下では、空孔半径  $r$  と光閉じ込めの関係を使用して GI 型フォトニック結晶スラブ内の光閉じ込めの必要条件を導出する。

【0084】

空気層 31 の光線行列を見れば分かるように、空孔にはレンズ効果は無く回折を促進する効果しかないので、GI 型スラブによるレンズ効果は空孔が無い場合の回折効果以上が必要である。

【0085】

従って、 $r=0$  を代入して得られる条件は、光閉じ込めの必要条件である。

【0086】

$r=0$  である時の GI 型フォトニック結晶スラブの入射端から  $Z$  位置での光線行列は、

【0087】



【数 8】

$$[GIPC(Z)] = \begin{bmatrix} \cos gZ & \frac{1}{g} \sin gZ \\ -g \sin gZ & \cos gZ \end{bmatrix}$$

【0088】

で表される。

【0089】

そして, (数7) は

【0090】

【数 9】

$$\begin{aligned} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 &= \left(\cos gZ + \frac{1}{R_1} \frac{1}{g} \sin gZ\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{\pi \omega_1^2}\right)^2 \left(\frac{1}{g}\right)^2 \sin^2 gZ \\ &= \frac{1}{R_1} \frac{1}{g} \sin 2gZ - \frac{1}{2} \left[ \left\{ \frac{1}{R_1^2} + \left(\frac{\lambda}{\pi \omega_1^2}\right)^2 \right\} \left(\frac{1}{g}\right)^2 - 1 \right] \cos 2gZ + \frac{1}{2} \left[ \left\{ \frac{1}{R_1^2} + \left(\frac{\lambda}{\pi \omega_1^2}\right)^2 \right\} \left(\frac{1}{g}\right)^2 + 1 \right] \\ &= \rho \sin\{2gZ - \theta\} + \frac{1}{2} \left[ \left\{ \frac{1}{R_1^2} + \left(\frac{\lambda}{\pi \omega_1^2}\right)^2 \right\} \left(\frac{1}{g}\right)^2 + 1 \right] \end{aligned}$$

【0091】

となる。ただし,

【0092】

【数 10】

$$\rho = \sqrt{\left(\frac{1}{R_1} \frac{1}{g}\right)^2 + \frac{1}{4} \left[ \left\{ \frac{1}{R_1^2} + \left(\frac{\lambda}{\pi \omega_1^2}\right)^2 \right\} \left(\frac{1}{g}\right)^2 - 1 \right]^2}$$

【0093】

となるように  $\rho$  をとり,

【0094】

【数 11】

$$\cos \theta = \frac{1}{R_1} \frac{1}{g}$$

【0095】

【数 12】

$$\sin \theta = \frac{1}{2} \left[ \left\{ \frac{1}{R_1^2} + \left( \frac{\lambda}{\pi \omega_1^2} \right)^2 \right\} \left( \frac{1}{g} \right)^2 - 1 \right]$$

【0096】

となるように  $\theta$  をとった。

【0097】

したがって、 $\omega_2$  の  $Z$  に関する最大値  $\omega_{2 \max}$  は、

【0098】

【数 13】

$$\begin{aligned} \left( \frac{\omega_{2 \max}}{\omega_1} \right)^2 &= \rho + \frac{1}{2} \left[ \left\{ \frac{1}{R_1^2} + \left( \frac{\lambda}{\pi \omega_1^2} \right)^2 \right\} \left( \frac{1}{g} \right)^2 + 1 \right] \\ &= \sqrt{\left( \frac{1}{R_1} \frac{1}{g} \right)^2 + \frac{1}{4} \left[ \left\{ \frac{1}{R_1^2} + \left( \frac{\lambda}{\pi \omega_1^2} \right)^2 \right\} \left( \frac{1}{g} \right)^2 - 1 \right]^2} + \frac{1}{2} \left[ \left\{ \frac{1}{R_1^2} + \left( \frac{\lambda}{\pi \omega_1^2} \right)^2 \right\} \left( \frac{1}{g} \right)^2 + 1 \right] \end{aligned}$$

【0099】

を満たす。

【0100】

これより  $R_1$  が大であるほど  $\omega_{2 \max}$  は小となって光を閉じ込めるために有利であることが分かるので、以下においては、

【0101】

【数 14】

$$R_1 = \infty$$

【0102】

よって

【0103】

【数 15】

$$\left( \frac{\omega_{2 \max}}{\omega_1} \right)^2 = \frac{1}{2} \left| \left( \frac{\lambda}{\pi \omega_1^2} \right)^2 \left( \frac{1}{g} \right)^2 - 1 \right| + \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{\lambda}{\pi \omega_1^2} \right)^2 \left( \frac{1}{g} \right)^2 + 1 \right\}$$

【0104】

である場合を考察する。

【0105】

(数 15) より、

【0106】

【数 1 6】

$$g < \frac{\lambda}{\pi \omega_1^2}$$

【0 1 0 7】

である場合には

【0 1 0 8】

【数 1 7】

$$\omega_{2 \max} = \frac{\lambda}{\pi \omega_1 g}$$

【0 1 0 9】

であり,

【0 1 1 0】

【数 1 8】

$$g \geq \frac{\lambda}{\pi \omega_1^2}$$

【0 1 1 1】

である場合には

【0 1 1 2】

【数 1 9】

$$\omega_{2 \max} = \omega_1$$

【0 1 1 3】

であることがわかる。

【0 1 1 4】

光が閉じ込められるための必要十分条件は,

【0 1 1 5】

【数 2 0】

$$\omega_{2 \max} \leq W/2$$

【0 1 1 6】

であるので, 光が閉じ込められるための必要条件として

【0 1 1 7】

【数 3】

$$g \geq \frac{2\lambda}{\pi\omega_1 W}$$

【0118】

が得られる。

【0119】

なお、(数 3) を導出するにあたって

【0120】

【数 2 1】

$$\omega_1 \leq W/2$$

【0121】

であることを用いたが、(数 2 1) において等号が成立する場合における (数 3) は、

【0122】

【数 2 2】

$$g \geq \frac{\lambda}{\pi} \left( \frac{2}{W} \right)^2$$

【0123】

となる。

【0124】

以上より、光を閉じ込めるために有利な条件は、高屈折率・大入射スポット径・大膜厚・短波長であることが分かる。

【0125】

$\lambda = 1.3 \mu\text{m}$  であるとして、(数 2 2) で等号をとって得られる最低屈折率分布定数と G I 型フォトニック結晶スラブの膜厚  $W$  の関係を図 4 に示す。

【0126】

ここに、図 4 は、空孔が無い G I 型スラブの場合の光閉じ込め条件 (膜厚  $W$  と屈折率分布定数  $g$  の関係) である。なお、縦軸には対数目盛りをとっている。

【0127】

図 4 においては、(入射端 9 の内側におけるビームスポット半径  $\omega_1$ ) / (入射端 9 の外側におけるビームスポット半径) に等しい  $n_1 / n_0$  を 1, 1.5, ..., 5 というように変化させたそれぞれの場合について、同関係を示した。

【0128】

したがって、図 4 においては入射端 9 の外側におけるビームスポット半径に関して図示を行っているので、厳密には (数 2 2) における  $W$  を  $(n_1 / n_0) W$  で置き換えて考えなければならない。

【0129】

これより、膜厚  $2 \mu\text{m}$  で入射端側の導波路の屈折率が G I 型フォトニック結晶スラブの極大屈折率に等しい場合 (すなわち、 $n_1 / n_0 = 1$  である場合) は、少なくとも  $400 / \text{mm}$  以上の屈折率分布定数  $g$  が必要であることがわかる。また、G I 型フォトニック結晶スラブの極大屈折率に当たる  $n_1$  をより大きくとったり、入射端の導波路の屈折率に当

たる  $n_0$  をより小さくすると、より小さな屈折率分布定数  $g$  で済むこともわかる。

#### 【0130】

次に、やはり  $\omega_1 = W/2$  である場合において、入射端側の導波路の屈折率に当たる  $n_0$  が G I 型フォトニック結晶スラブの極大屈折率に当たる  $n_1$  に等しいとして、 $r = 0 \mu\text{m}$  (空孔が無い) 場合と、おおよそ  $r = 0.19 \mu\text{m}$ ,  $d = 0.74 \mu\text{m}$  である場合の G I 型フォトニック結晶スラブ内での最大スポット半径  $\omega_{2\text{max}}$  と屈折率分布定数  $g$  と入射端スポット半径  $\omega_1$  の関係を、図 5 と図 6 に示す。

#### 【0131】

ここに、図 5 は、空孔が無い G I 型スラブの場合の入射端でのスポット径  $\omega_1$  毎の最大スポット径  $\omega_{2\text{max}}$  と屈折率分布定数  $g$  の関係である。また、図 6 は、空孔半径  $r$  と周期  $\delta (= d + 2r)$  の関係が約  $r = 0.2 \times \delta$  の場合の、G I 型スラブの場合の入射端でのスポット径  $\omega_1$  毎の最大スポット径  $\omega_{2\text{max}}$  と屈折率分布定数  $g$  の関係である。なお、縦軸および横軸には対数目盛りをとっている。

#### 【0132】

図 5～6 においては、 $\omega_1$  を 0.1, 0.5, ..., 4 というように変化させたそれぞれの場合について、同関係を示した。

#### 【0133】

(数 16) が成立する場合において (数 15) より得られる

#### 【0134】

#### 【数 23】

$$\frac{\omega_{2\text{max}}}{\omega_1} = \frac{\lambda}{\pi \omega_1^2} \frac{1}{g}$$

#### 【0135】

が、図 5 における関係に相当する。ただし、入射端スポット半径  $\omega_1$  が G I 型フォトニック結晶スラブの膜厚  $W$  の半分である場合を考えているので、G I 型フォトニック結晶スラブ内最大ビームスポット半径  $\omega_{2\text{max}}$  が入射端スポット半径  $\omega_1$  よりも小さくなくてはならない。したがって、 $\omega_{2\text{max}} / \omega_1$  が 1 以下となることが光閉じ込めの必要十分条件となり、図 5 の  $\omega_{2\text{max}} / \omega_1 = 1$  となる時の屈折率分布定数  $g$  と入射端スポット半径  $\omega_1$  の関係が、図 4 における関係に相当することになる。

#### 【0136】

図 5 と図 6 を比較すると、空孔の有無に関わらず、屈折率分布定数  $g$  と  $\omega_{2\text{max}}$  との関係は類似することがわかる。ただし、空孔の存在により回折が大きくなるので、空孔がある場合には、空孔が無い場合に比べてより約 1.5 倍程度の大きな屈折率分布定数  $g$  が必要である。

#### 【0137】

図 7 に、(a) 光の伝搬方向に関して屈折率分布がステップ状に変化する S I (Step-Index) 型フォトニック結晶スラブの光閉じ込め条件を満足する場合における三次元 FDTD (Finite Difference Time Domain) シミュレーション結果と、(b) エアブリッジ構造 S I 型フォトニック結晶スラブの光閉じ込め条件を満足する場合における三次元 FDTD シミュレーション結果と、(c) 本実施の形態における、おおよそ  $r = 0.19 \mu\text{m}$ ,  $d = 0.74 \mu\text{m}$  の G I 型フォトニック結晶スラブの光閉じ込め条件を満足する場合における三次元 FDTD シミュレーション結果を示す。ただし、伝搬方向と膜厚方向を含む断面のみ示す。

#### 【0138】

S I 型フォトニック結晶スラブ (図 7 (a) 参照) での光の漏れも、エアブリッジ構造 (図 7 (b) 参照) にすると、光が完全に閉じ込められることがわかる。

#### 【0139】

G I 型フォトニック結晶スラブ (図 7 (c) 参照) の場合は, 基板付きでも光は閉じ込められ, 光はレンズ効果により蛇行軌跡を画くことがわかる (集光部分のみが図示されている)。

【0140】

このように, 膜厚方向の中心付近で極大値を有し, 極大部分から離れるに従って屈折率がほぼ放物線状に低下する G I 型フォトニック結晶スラブの屈折率分布定数  $g$  を膜厚などから決まる特定の値以上にする事で, 回折効果で光が漏れる膜厚方向において基板の屈折率に関わらず光を閉じ込めることができる。

【0141】

また, 屈折率分布定数  $g$  を操作することでフォトニック結晶スラブの膜厚を自由に変化させることもできる。

【0142】

なお, 本実施の形態では膜厚の中心近傍で極大点を有する G I 型フォトニック結晶スラブについて説明した。

【0143】

しかし, これに限らず, 図 8 に示すように,  $y = 0$  に当たる中心からの距離が平坦部分定数  $a$  以内の一定部分 18, および一定部分 18 以外の屈折率分布部分 19 を利用して, 屈折率が

【0144】

【数 2】

$$n'(y) = \begin{cases} n_1 \left\{ 1 - \frac{g^2 (y+a)^2}{2} \right\} & (y \leq -a) \\ n_1 & (-a \leq y \leq a) \\ n_1 \left\{ 1 - \frac{g^2 (y-a)^2}{2} \right\} & (a \leq y) \end{cases}$$

【0145】

に沿って低下するようにしてもよい。

【0146】

ここに, 図 8 は, 膜厚方向において中心付近ではほぼ一定値の極大領域を形成し, それ以外で極大領域からの距離に従ってほぼ放物線状に屈折率が低下する屈折率分布を有する G I 型フォトニック結晶スラブの膜厚方向と伝搬方向を含む断面概要図である。

【0147】

これでも, 屈折率一定部分以外においてレンズ効果が生じるので, 同様に光の閉じ込めができる。

【0148】

もちろん, 一定部分 18 では, 膜厚方向 15 の屈折率が一定であるので, 回折の効果がより強く出るが, 屈折率分布部分 19 で屈折率分布定数  $g$  を大きくすれば, 何ら問題は無い。

【0149】

むしろ, この構成の目的は, 一定部分 18 において膜厚方向 15 の屈折率を一定にすることにより, 一定部分 18 における膜厚方向以外のフォトニック結晶の特性を制御し易くするためにある。

【0150】

より具体的に述べると, フォトニック結晶の特性 (フォトニックバンド) は, 周期的に



構成される材料の屈折率が一定である場合の方が計算しやすいので、現在のところはこのように一定部分 18 を設けた方が設計しやすい。

【0151】

しかし、膜厚全体に渡って屈折率分布がある場合でも、屈折率の最大値と最小値の差が数%以下と小さければ、フォトニック結晶の特性は屈折率が一定の場合の特性からの小さな変化であると考えられ、実用上は問題が無い場合が多い。

【0152】

なお、上述したフォトニック結晶の製造方法について以下に説明する。

【0153】

基板上に溜めたポリシランの上下から、加熱を行うとともに紫外線 (UV) を照射して膜厚方向に屈折率分布を形成するメカニズムを、本発明の実施の形態 1 の GI 型フォトニック結晶の製造方法の説明図である図 16 を使用して説明する。

【0154】

なお、紫外線露光で硬化する場合に、基板側から露光するのであれば、紫外線に対して透明な材料 (例えば、石英やパイレックス (登録商標) などのガラス) を使用し、基板側から露光しないのであれば、ガラス以外のシリコンや樹脂など紫外線に対して不透明な材料を使用する。

【0155】

ポリシランは、紫外線露光や熱処理によって起こる硬化時の酸化により屈折率のより小さなシロキサン構造に変化するので、酸化しないポリシラン構造部分と酸化により発生するシロキサン構造部分の比率を制御することで、屈折率分布を形成することができる。

【0156】

ポリシランの膜厚が小さい場合は、雰囲気中の酸素によりポリシラン内では表面から内部に向かって酸素濃度が低下するので、自然に酸素濃度の低い内部から酸素濃度の高い表面に向かって屈折率が低下するような屈折率分布が得られる。

【0157】

ポリシランの膜厚が大きい場合は、雰囲気中の酸素以外に、予め硬化前のポリシラン内部に酸素あるいは酸化物を所望の分布で拡散させておくことで、酸化時の屈折率分布を任意に制御することも可能である。

【0158】

また、ポリシランを両面から対称的に酸化させることで、厚さ方向の中心に対して対称形状の屈折率分布を形成することができる。

【0159】

(実施の形態 2)

つぎに、図 9 を主として参照しながら、本実施の形態の光デバイスの構成および動作について説明する。

【0160】

ここに、図 9 は、光閉じ込め条件を満足するために一部の膜厚変化に応じて屈折率分布形状を変化させる GI 型フォトニック結晶スラブの膜厚方向と伝搬方向を含む断面概要図である。

【0161】

図 9 に示すように、GI 型フォトニック結晶スラブが、伝搬方向に当たる  $z$  方向のある部分で膜厚  $W$  が変化する膜厚減少部分 90 を有する。そして、膜厚減少部分 90 において光が閉じ込められるように変化した膜厚に対して、前述の光閉じ込め条件を満足するように、屈折率分布定数  $g$  をより大きく変化させる。

【0162】

膜厚が途中で小さくなっているので、膜厚減少部分 90 のより大きな回折を抑制するために、最低屈折率分布定数増加部分 91 が生じる。

【0163】

ただし、膜厚変化が膜厚方向で対称でない場合は、屈折率分布定数の変化だけでなく膜

厚減少部分屈折率極大位置 92 も周囲とずらす必要がある。膜厚が対称に変化している場合には屈折率極大部分は周囲と同じでよい。

【0164】

逆に、膜厚が大きくなっている場合は、最低屈折率分布定数は周囲よりも小さくて済むため、屈折率分布定数は必ずしも変化させる必要は無い。

【0165】

なお、膜厚が小さくなる場合でも、膜厚減少部分 90 以外の屈折率分布定数が膜厚減少部分 90 の最低屈折率分布定数以上であれば、屈折率分布定数を変化させる必要は必ずしも無い。

【0166】

もちろん、伝搬方向に当たる z 方向と膜厚方向に当たる y 方向を含む断面内での膜厚変化の場合を説明したが、幅方向に当たる x 方向の膜厚変化についても同様である。

【0167】

なお、膜厚最少部分の膜厚に対する光閉じ込め条件を満足する最低屈折率分布定数以上の屈折率分布定数を使用することにすれば、GI 型フォトニック結晶スラブ全体において一定の屈折率分布定数を用いてもよい。

【0168】

また、GI 型フォトニック結晶スラブ内において、ビームスポット半径が極小となる部分で膜厚が小さくなる場合には、光閉じ込め条件を満足する最低屈折率分布定数はより小さくて済む。なぜなら、光閉じ込め条件を満足する最低屈折率分布定数は、ビームスポット半径の極大値が膜厚を超えないように決めていているからである。

【0169】

(実施の形態 3)

つぎに、図 10 を主として参照しながら、本実施の形態の光デバイスの構成および動作について説明する。

【0170】

ここに、図 10 は、意図的に一部で光閉じ込め条件を満足しない（光漏れ部分）屈折率分布 103 を形成し、伝搬ロスを制御する GI 型フォトニック結晶スラブの膜厚方向と伝搬方向を含む断面概要図である。

【0171】

GI 型フォトニック結晶スラブが、伝搬方向に当たる z 方向のある部分に屈折率分布定数が光閉じ込めに必要な最低屈折率分布定数以下の光漏れ部分 101 を有し、意図的に光をロスさせるアッテニューエータ機能あるいはドロップ機能が付加されている。

【0172】

本実施の形態では、GI 型フォトニック結晶スラブの上クラッドが空気で下クラッドが基板であるため、光漏れ部分 101 での光の漏れは基板側のみとなる。

【0173】

ドロップ機能を利用する場合には、漏れ光 102 がクラッドモードとなって基板中を伝搬し、GI 型フォトニック結晶スラブ内を伝搬する本信号と分離される。

【0174】

もちろん、直接的に屈折率分布定数を光閉じ込めに必要な最低屈折率分布定数以下にして光漏れを起こす方法について説明したが、膜厚を薄くして光閉じ込めに必要な最低屈折率分布定数を大きくし、屈折率分布定数を相対的に光閉じ込めに必要な最低屈折率分布定数以下にすることもできる。

【0175】

なお、伝搬方向に当たる z 方向と膜厚方向に当たる y 方向とを含む断面内での屈折率分布定数変化を説明したが、幅方向に当たる x 方向の屈折率分布定数変化についても同様である。

【0176】

また、GI 型フォトニック結晶スラブ内において、ビームスポット半径が極大になる部

分で光閉じ込め条件を満足しないようにすることにより、容易に光の漏れを引き起こすことができる。

【0177】

(実施の形態4)

つぎに、図11を主として参照しながら、本実施の形態の光デバイスの構成および動作について説明する。

【0178】

ここに、図11は、ビームスポットが小さくなるビームウェスト領域において特定のフォトニック結晶の機能を引き出すための周期構造を形成したGI型フォトニック結晶スラブの膜厚方向と伝搬方向を含む断面概要図である。

【0179】

図11に示すように、GI型フォトニック結晶スラブ内のビームスポット半径が極小となるビームウェスト110において特定の機能を持たせるための、周囲とは異なる周期を有する機能部分111を形成するものである。

【0180】

ビームウェスト110で特定の機能を有する機能フォトニック結晶部分を形成すると、ビームが通過する部分の屈折率変化が最少となるため、フォトニック結晶のフォトニックバンドを利用したデバイス設計が容易になる。

【0181】

もちろん、周期を変化させる場合を説明したが、要するに、フォトニック結晶の特性を変化させればよい。

【0182】

以上においては、本実施の形態1～4について詳細に説明を行った。

【0183】

(A) なお、空孔の深さがGI型フォトニック結晶スラブの高さに一致している場合について説明を行ったが、図12に示すように、光の閉じ込めをより確実とするために、基板3'に基板内空孔120が形成されていてもよい。

【0184】

ここに、図12は、基板まで空孔が延長されたGI型フォトニック結晶スラブの断面図である。

【0185】

なお、基板3'は、本発明の基板に対応する。

【0186】

(B) また、無欠陥のGI型フォトニック結晶スラブに付いて説明したが、図13に示すように、GI型フォトニック結晶スラブは空孔が存在しない周期欠陥部分130を有してもよい。

【0187】

ここに、図13は、入射端から出射端まで連続して周期欠陥列を有するGI型フォトニック結晶スラブの斜視図である。

【0188】

このような1次元欠陥のある場合は、欠陥部分が上述した空孔の無いGI型スラブのモデルに相当するので、光閉じ込め条件を満足する最低屈折率分布定数は周囲の無欠陥部分よりも小さくなり、空孔が存在する無欠陥部分でも欠陥部分でも光の閉じ込めが可能である。

【0189】

空孔が周期的に並ぶ周期無欠陥部分にフォトニックバンドギャップが存在する場合は、光は、周期無欠陥部分へ進入ができない。したがって、光は、膜厚方向の閉じ込めも有効なので、周期欠陥方向へのみ伝搬することになる。

【0190】

なお、周期欠陥を形成するためには、周期的に配置した材料の、屈折率、周期、形状の

内の少なくともひとつを変化させればよい。

【0191】

(C) また、光閉じ込め条件を満足する G I 型フォトニック結晶スラブと外部入力部との接続を行うための手段が、利用されてもよい。

【0192】

上述したように、G I 型フォトニック結晶スラブ内での回折は、G I 型フォトニック結晶スラブの入射端でのビーム状態（曲率半径  $R_1$ 、ビームスポット半径  $\omega_1$ ）に大きく左右される。

【0193】

たとえば、曲率半径が無限大で、ビームスポット半径が極小となるビームウェストが入射端よりも手前に有る場合、入射端ではビームは広がり気味に入射する。このような場合には、G I 型フォトニック結晶スラブ内での最大スポット半径  $\omega_{2\max}$  は、入射端でビームウェストがある場合に比較して大きくなる。

【0194】

一方、ビームウェストが入射端よりも内部に有る場合、入射端ではビームはしぼみ気味に入射する。このような場合には、G I 型フォトニック結晶スラブ内でのビームウェストの半径が入射端でビームウェストがある場合よりも小さくなるため、回折が大きくなり、最大スポット半径  $\omega_{2\max}$  は、入射端でビームウェストがある場合に比較して大きくなる。

【0195】

従って、ビームウェストが入射端にある場合に、G I 型フォトニック結晶スラブ内での最大スポット半径  $\omega_{2\max}$  が、最も小さい。

【0196】

ただし、このようなビームウェストとは、G I 型フォトニック結晶スラブのレンズ効果によるものではなく、入射端近傍に生じる入射状態に依存するビームスポット半径が極小となる部分である。

【0197】

なお、入射端でビームウェストができる場合でも、ビームスポット半径  $\omega_1$  が大きいほど、回折が小さく、光閉じ込めのための最低屈折率分布定数も小さくて済む。このため、入射端でのビームスポット半径  $\omega_1$  は、G I 型フォトニック結晶スラブの膜厚の半分に近いほど良い。

【0198】

ただし、このような入射端でのビームスポット半径  $\omega_1$  とは、G I 型フォトニック結晶内部側、すなわち、G I 型フォトニック結晶スラブの屈折率でのビームスポット半径のことである。なお、入射直前のビームスポット半径で議論する場合には、G I 型フォトニック結晶スラブと入射側の材料の位相速度が異なるため、ビームスポット半径の変換が必要である。

【0199】

さて、入射端において上述のようなビーム状態を作る方法として、図 14 に示すようにレンズ 141 などのビーム変換部を使用して、入射端にビームスポット半径が膜厚の半分にほぼ等しいビームウェストを形成する方法がある。

【0200】

ここに、図 14 は、入射端で曲率半径が無限大となるビーム状態を形成するレンズを入射部に設けた G I 型フォトニック結晶スラブの膜厚方向と伝搬方向を含む断面概要図である。

【0201】

なお、レンズ 141 は、本発明の誘導部に対応する。

【0202】

入射側が光源ビーム 140 を使用した空間結合の場合は、同位相面として入射する波面 142 は広がり気味なので、入射端でビームウェストが形成されるように、レンズ 141



を使用してしほみ気味に変換すると良い。

【0203】

なお、入射側が導波路の場合は、導波路のモードフィールド径とGI型フォトニック結晶スラブのモードフィールド径とがほぼ一致する（すなわち、導波路の屈折率とGI型フォトニック結晶スラブの屈折率とがほぼ等しい）のであれば、導波路コア径と膜厚とがほぼ一致していればよい。

【0204】

しかし、図15のように、モードフィールド径のみならず、導波路に当たる光ファイバーの光軸153もずれている場合には、膜厚方向に関するテーパ156および屈折率分布を利用するビーム変換の機能と、光を誘導する機能とを有するビーム誘導部154を、中継ぎに使用してもよい。

【0205】

ここに、図15は、膜厚方向において膜厚と異なるコア径を有する光ファイバーと結合するために、入射端にテーパと膜厚方向の屈折率分布とを有するビーム誘導部を設けたGI型フォトニック結晶スラブの膜厚方向と伝搬方向を含む断面概要図である。

【0206】

なお、ビーム誘導部154は、本発明の誘導部に対応する。

【0207】

図15には、ビームスポット軌跡155も図示した。

【0208】

もちろん、入力側について説明したが、光が双方向に伝搬する場合には、GI型フォトニック結晶スラブの出力側にも入力側と同じ構造を設ければよい。

【0209】

(D) また、上述した実施の形態においては、フォトニック結晶は、膜形状を有し、第一の方向は、膜形状の膜厚の方向であり、第二の方向は、膜形状の膜面に平行な方向であった。

【0210】

しかし、これに限らず、本発明の実施の形態の円柱形状を有するGI型フォトニック結晶の概要図である図17に示されているように、フォトニック結晶は、円柱形状を有し、第一の方向は、円柱形状の底面に平行なx方向およびy方向であり、第二の方向は、円柱形状の長さのz方向であってもよい。

【0211】

なお、このようなフォトニック結晶は、第一の材料201の中に、z方向に関して実質的に周期的に配置された第二の材料202を有し、第一の材料201は、光軸の方向に当たるz方向に垂直なx方向およびy方向の二方向に、たとえば、中心からの距離に従ってほぼ放物線状に屈折率が低下する屈折率分布を有することになる。

【産業上の利用可能性】

【0212】

本発明の光デバイスは、フォトニック結晶スラブの光閉じ込め構造として有用である。

【図面の簡単な説明】

【0213】

【図1】 本発明の実施の形態1のGI型フォトニック結晶スラブの断面概要図

【図2】 本発明の実施の形態1のGI型フォトニック結晶スラブの概要図

【図3】 本発明の実施の形態1のGI型フォトニック結晶スラブの解析用モデルの概要図

【図4】 本発明の実施の形態1の空孔が無い場合のGI型フォトニック結晶スラブの光閉じ込め条件の説明図

【図5】 本発明の実施の形態1の空孔が無い場合のGI型フォトニック結晶スラブ内の最大スポット径 $\omega_2$ と屈折率分布定数 $g$ の関係の説明図

【図6】 本発明の実施の形態1の空孔半径 $r$ と周期 $\delta$ の関係が約 $r = 0.2 \times \delta$ の場合

合の G I 型フォトニック結晶スラブ内の最大スポット径  $\omega_2$  と屈折率分布定数  $g$  の関係の説明図

【図 7】本発明の実施の形態 1 の G I 型フォトニック結晶スラブの三次元 F D T D シミュレーション結果の説明図

【図 8】本発明の実施の形態 1 の G I 型フォトニック結晶スラブ（変形例）の概要図

【図 9】本発明の実施の形態 2 の膜厚が変化する G I 型フォトニック結晶スラブの断面概要図

【図 10】本発明の実施の形態 3 の意図的に伝搬ロスを制御する G I 型フォトニック結晶スラブの断面概要図

【図 11】本発明の実施の形態 4 のビームウェスト近傍で周期構造変化させた G I 型フォトニック結晶スラブの断面概要図

【図 12】本発明の実施の形態の基板内部まで空孔が延長された G I 型フォトニック結晶スラブの断面概要図

【図 13】本発明の実施の形態の入射端から出射端まで周期欠陥列を有する G I 型フォトニック結晶スラブの概要図

【図 14】本発明の実施の形態の入射端にビームウェストを形成するレンズを入射部に設けた G I 型フォトニック結晶スラブの断面概要図

【図 15】本発明の実施の形態の膜厚と異なるコア径を有する光ファイバーとの間に膜厚方向にテーパと屈折率分布を有するビーム誘導部を設けた G I 型フォトニック結晶スラブ断面概要図

【図 16】本発明の実施の形態 1 の G I 型フォトニック結晶の製造方法の説明図

【図 17】本発明の実施の形態の円柱形状を有する G I 型フォトニック結晶の概要図

【符号の説明】

【0214】

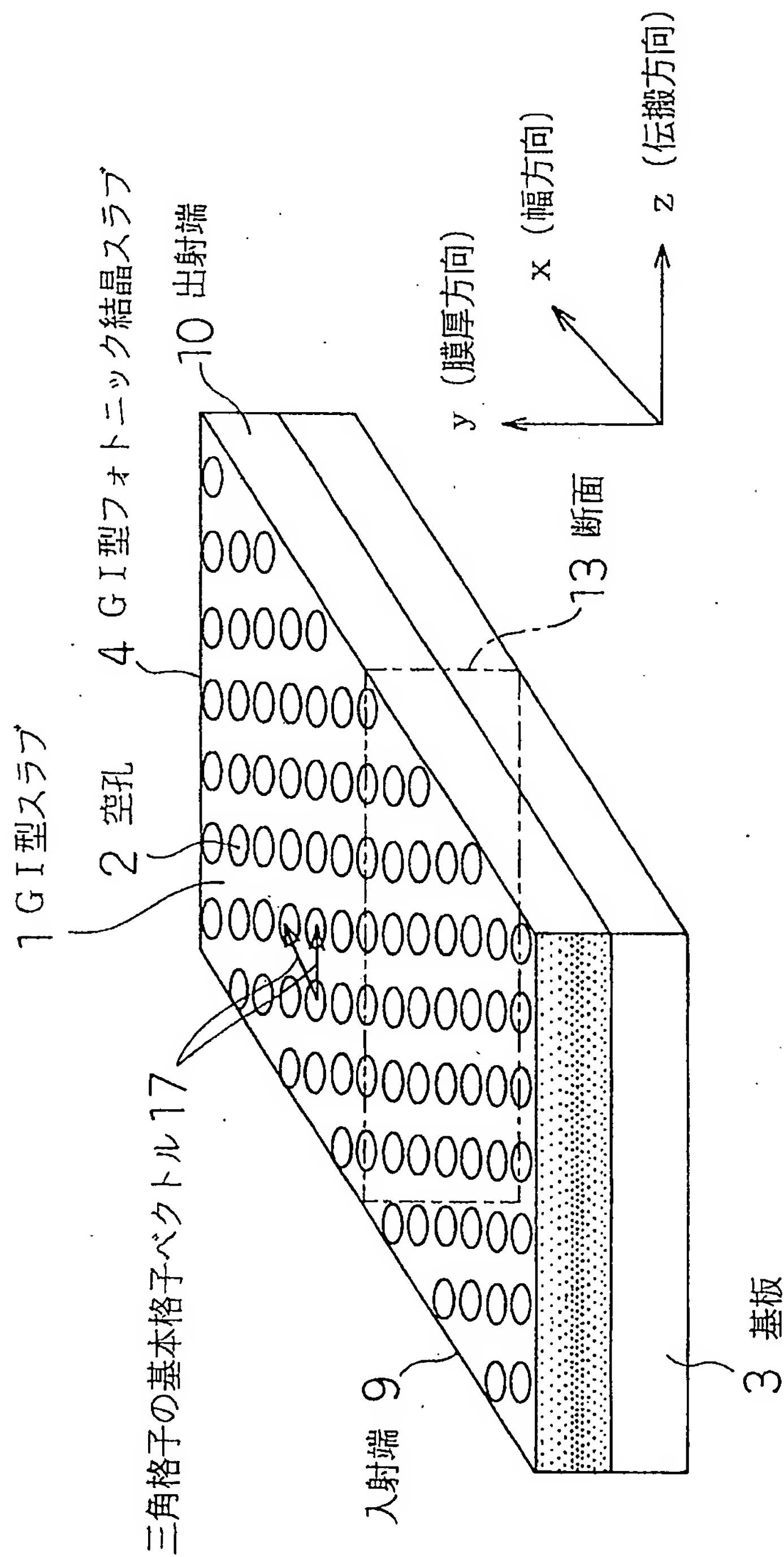
- 1 G I 型スラブ
- 2 空孔
- 3 基板
- 4 G I 型フォトニック結晶スラブ
- 5 入射側導波路
- 9 入射端
- 10 出射端
- 12 屈折率分布
- 13 断面
- 17 三角格子の基本格子ベクトル
- 18 一定部分
- 19 屈折率分布部分
- 20 光軸（屈折率極大位置）
- 30 GRIN レンズ
- 31 空気層
- 90 膜厚減少部分
- 91 最低屈折率分布定数増加部分
- 92 膜厚減少部分屈折率極大位置
- 100 光閉じ込め部分
- 101 光漏れ部分
- 102 漏れ光
- 103 （漏れ部分）折率分布
- 110 ビームウェスト
- 111 機能部分
- 120 基板内空孔
- 130 周期欠陥部分



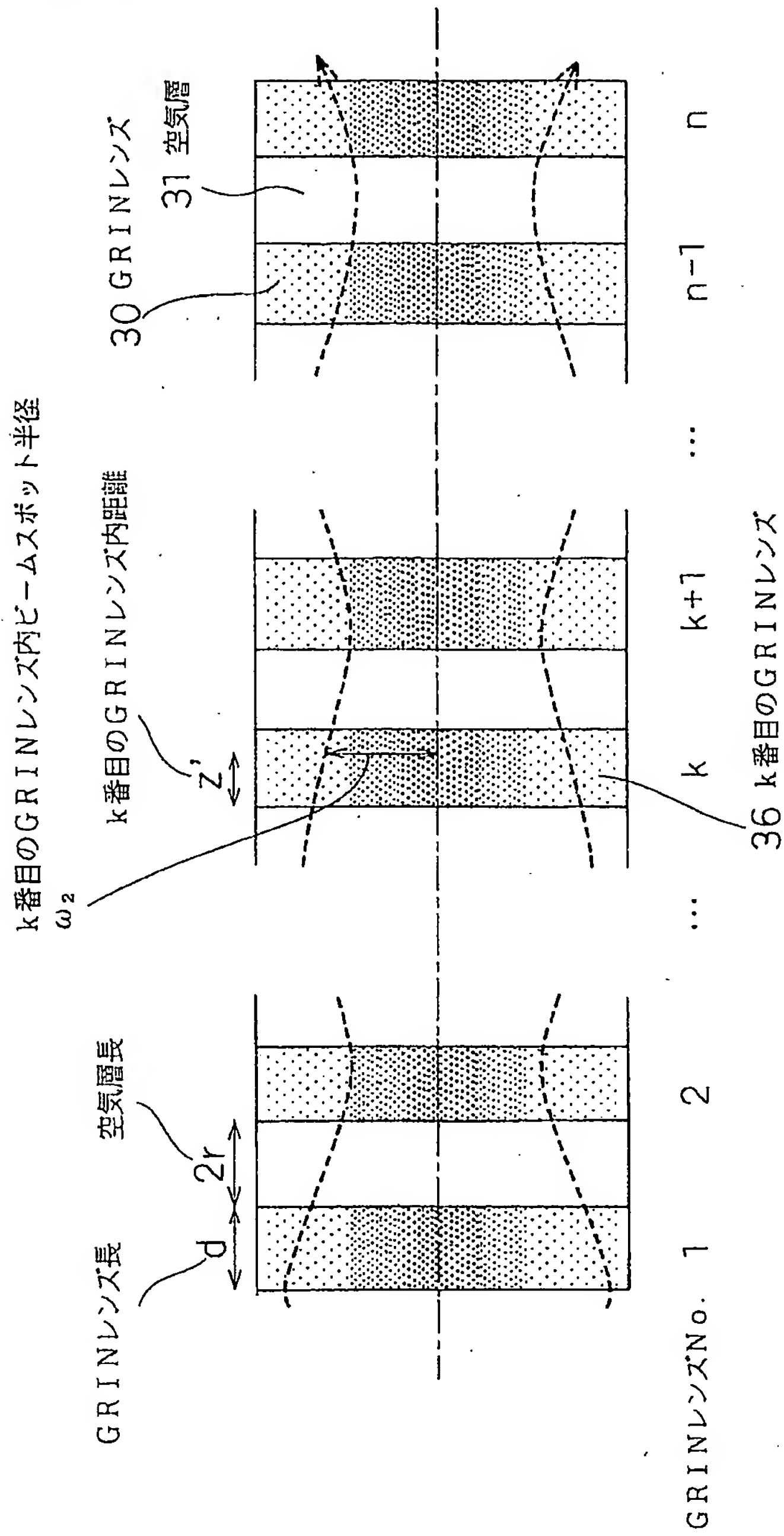
- 1 4 0 光源ビーム
- 1 4 1 レンズ
- 1 4 2 波面
- 1 5 0 光ファイバー
- 1 5 1 コア
- 1 5 2 クラッド
- 1 5 3 光ファイバーの光軸
- 1 5 4 誘導部
- 1 5 5 ビームスポット軌跡
- 1 5 6 テーパー



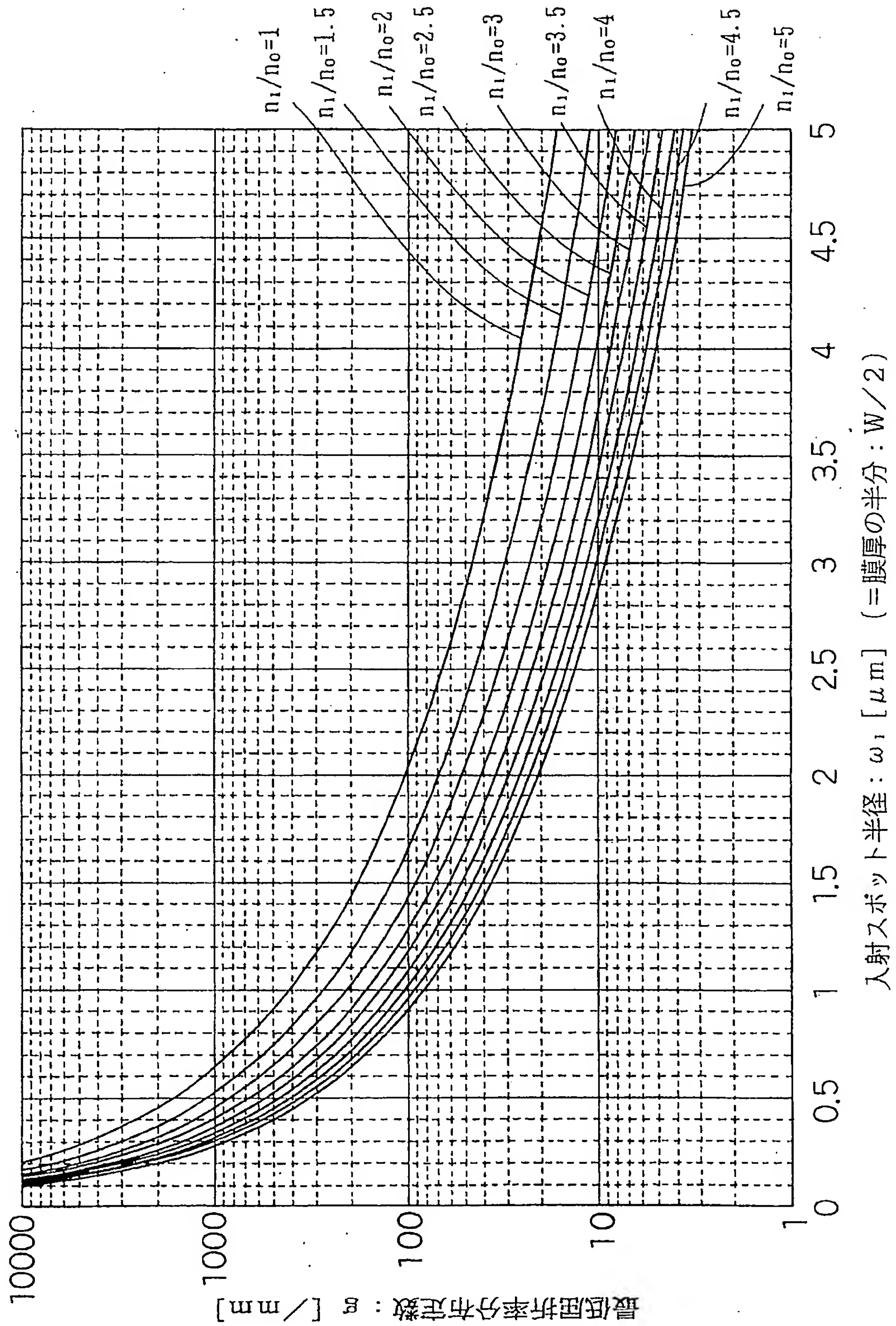
【図 2】



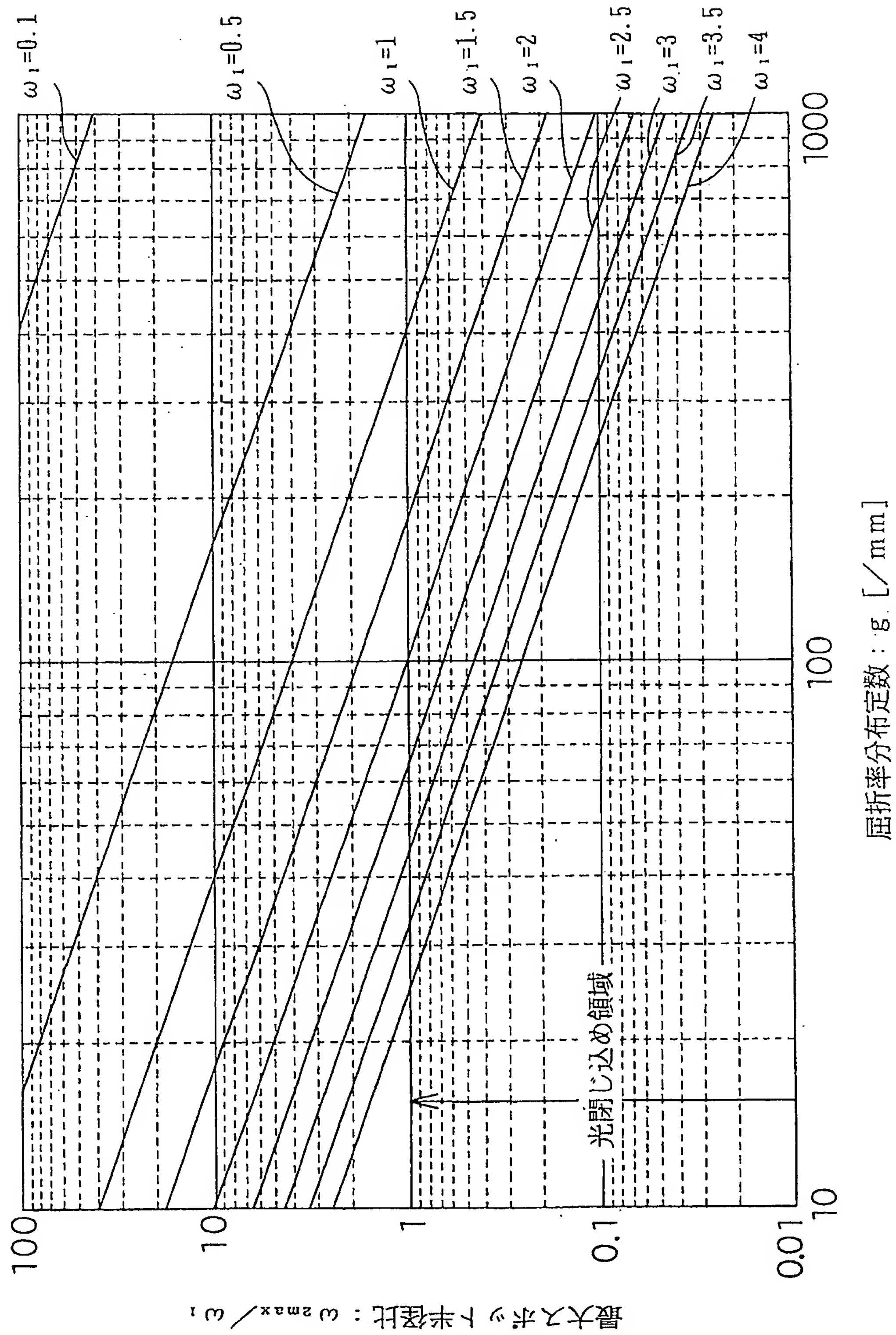
【図 3】



【図 4】

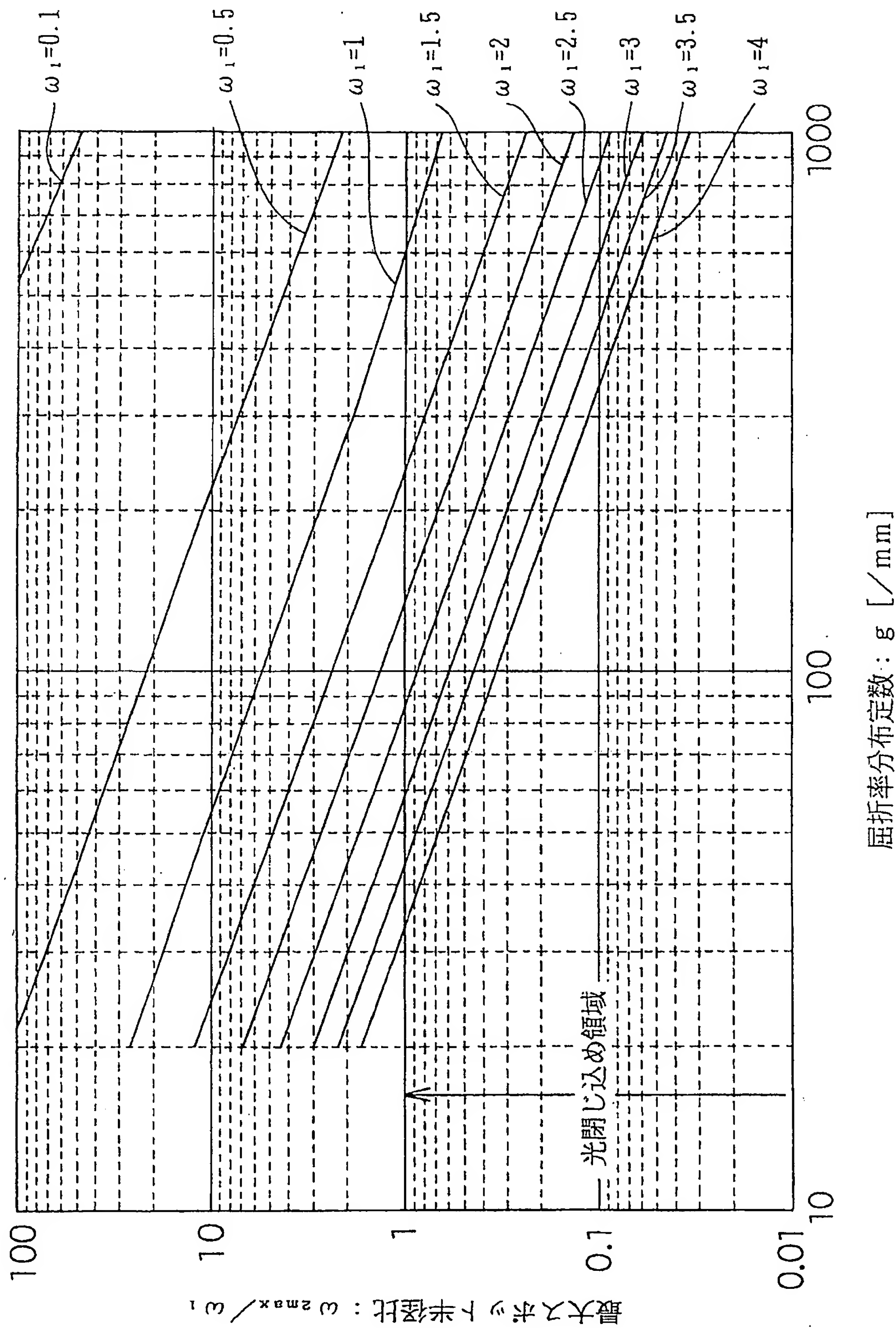


【図 5】



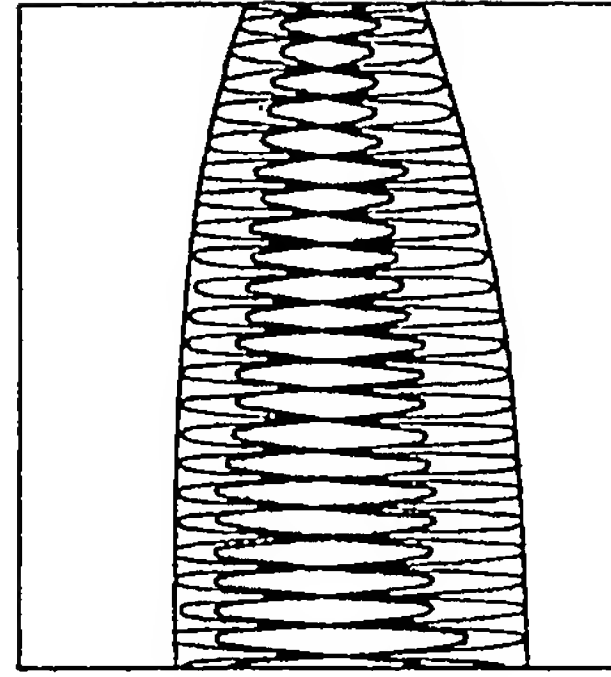
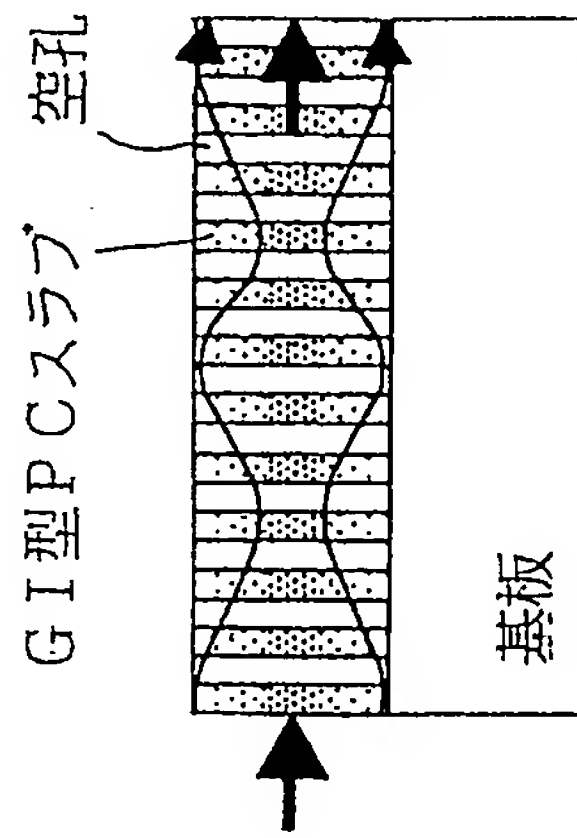


【図 6】

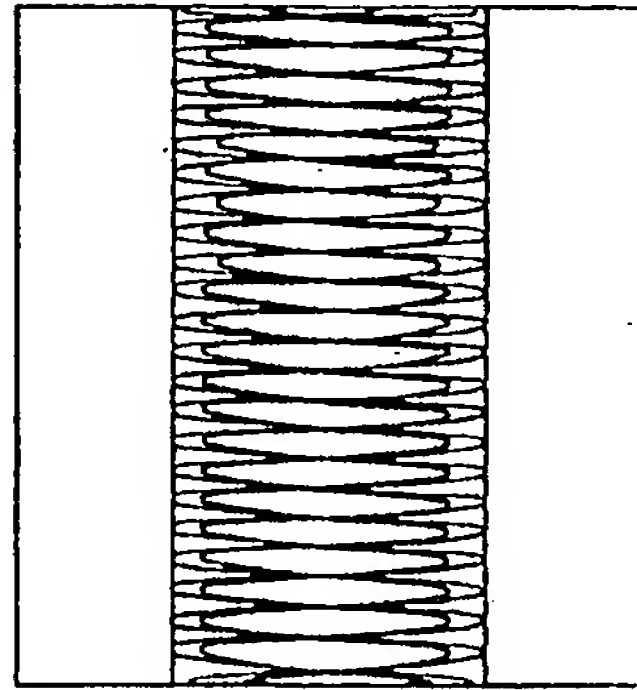
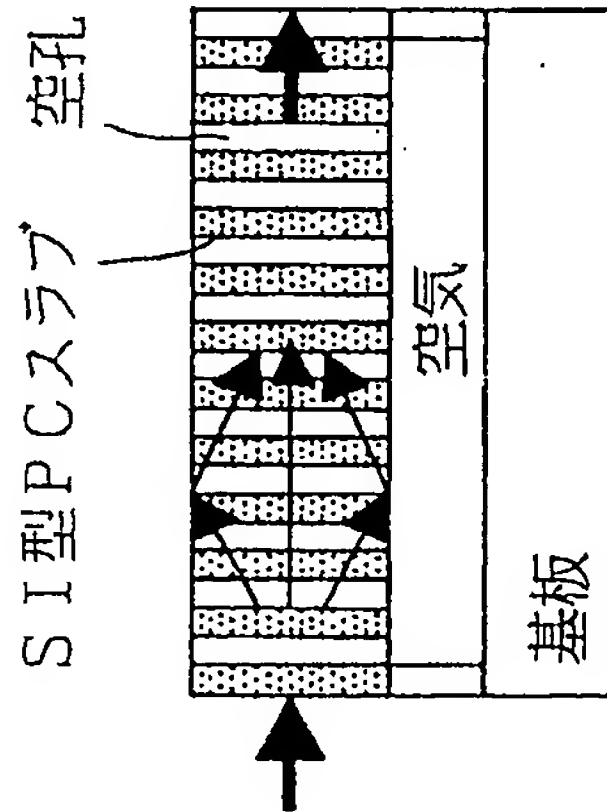


【図 7】

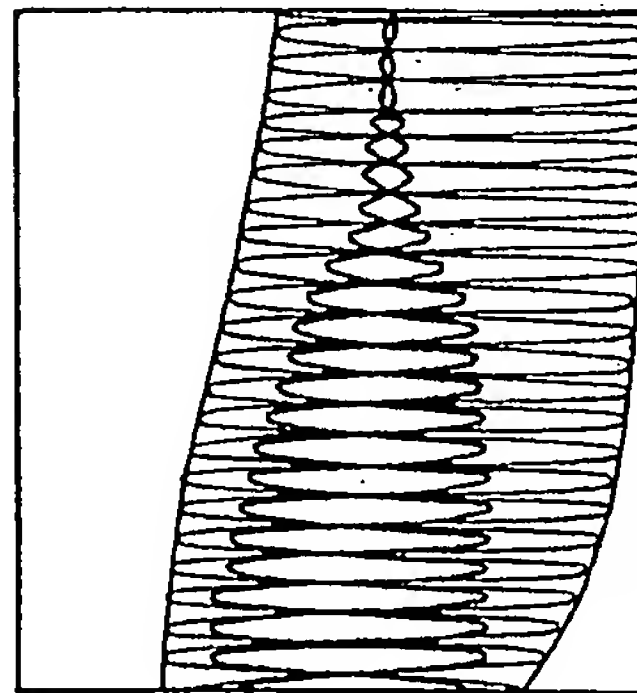
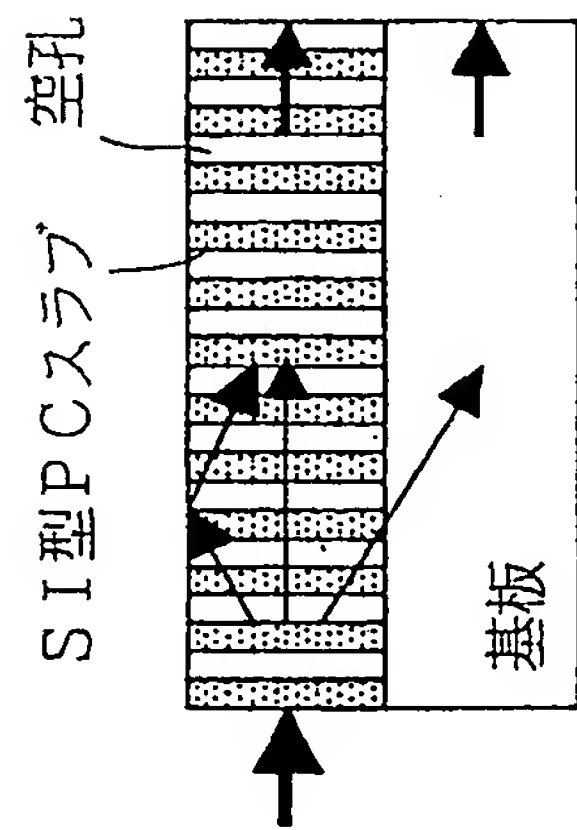
(c) GI型フォトリソニック結晶  
スラブ (基板付)



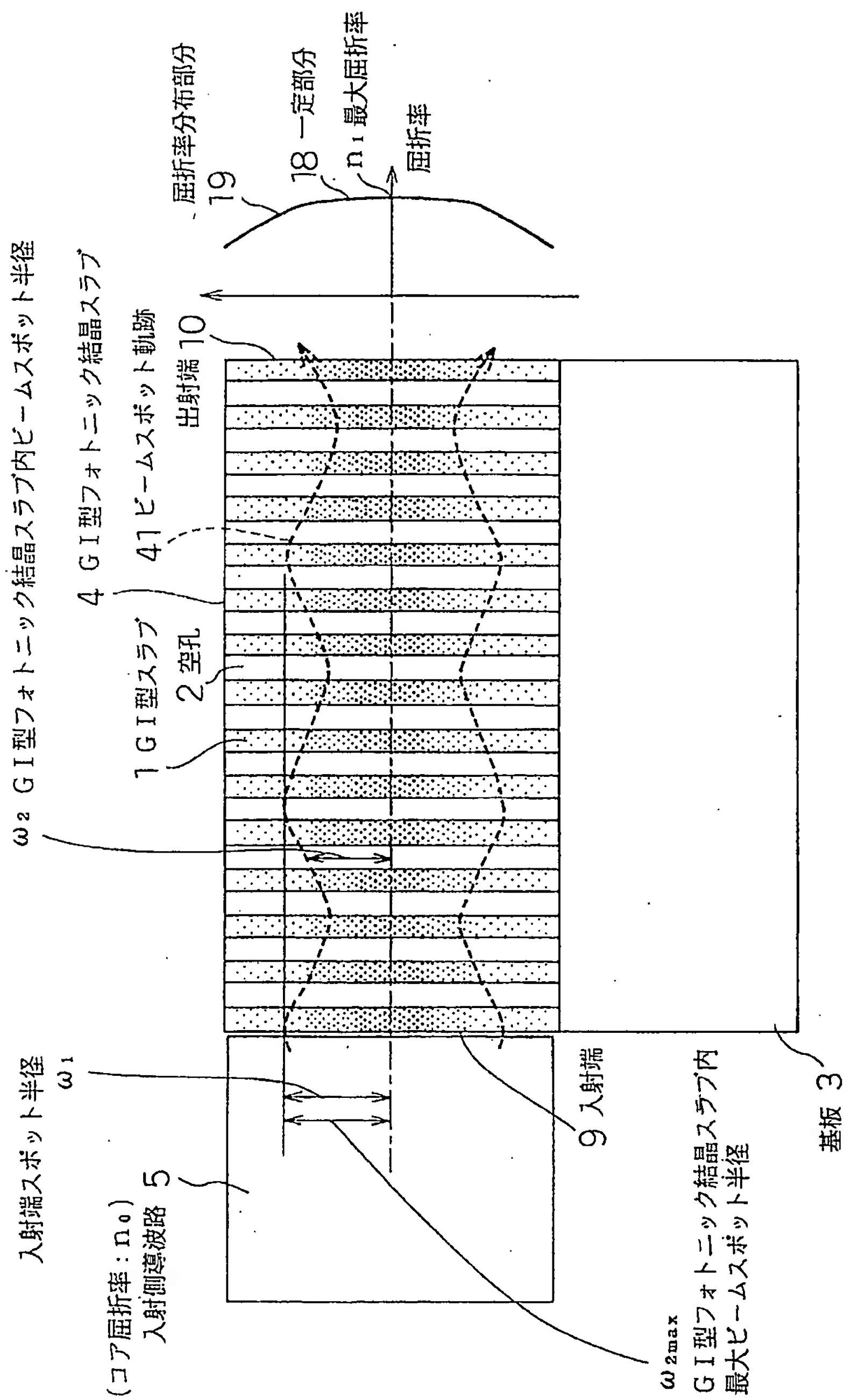
(b) エアーブリッジ



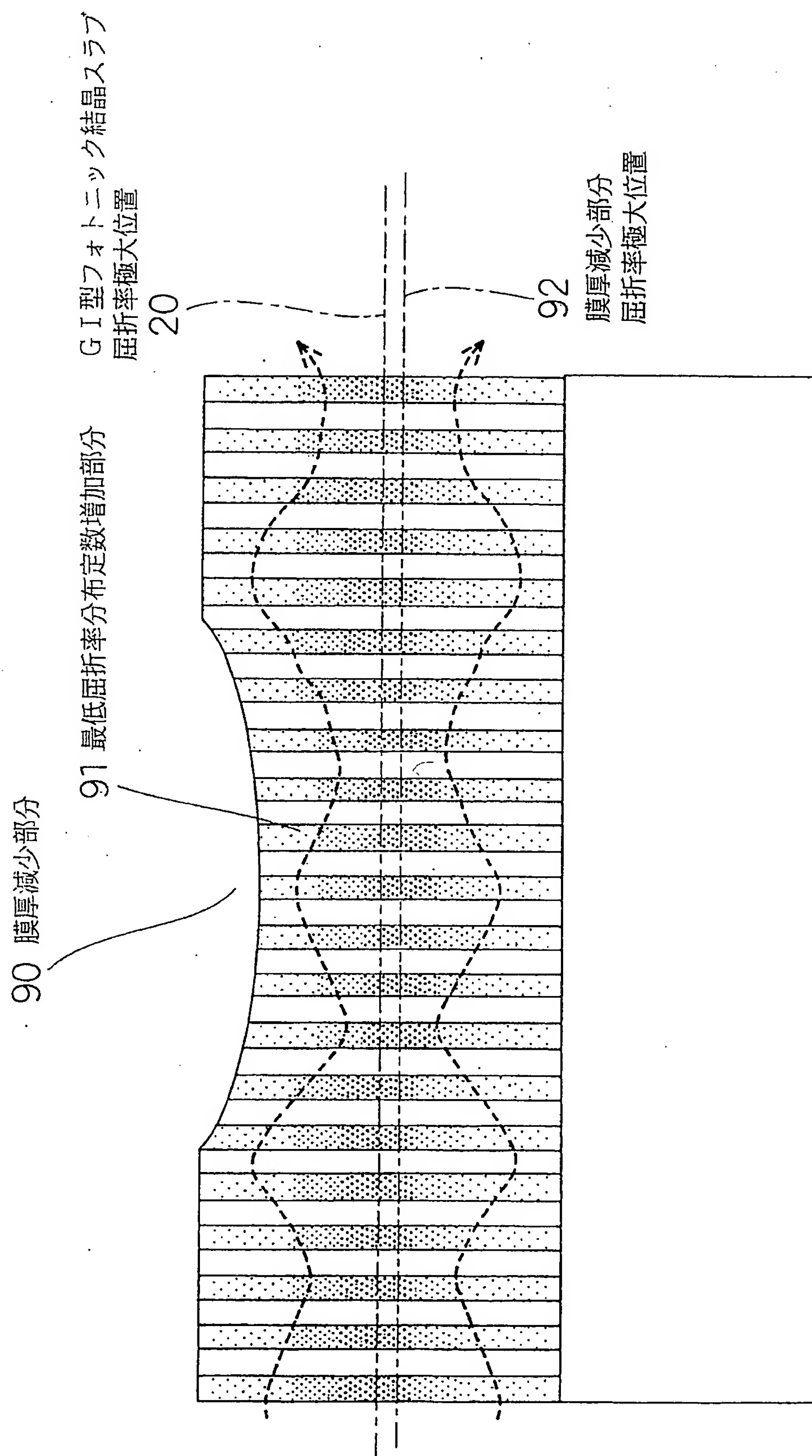
(a) SI型フォトリソニック結晶  
スラブ (基板付)



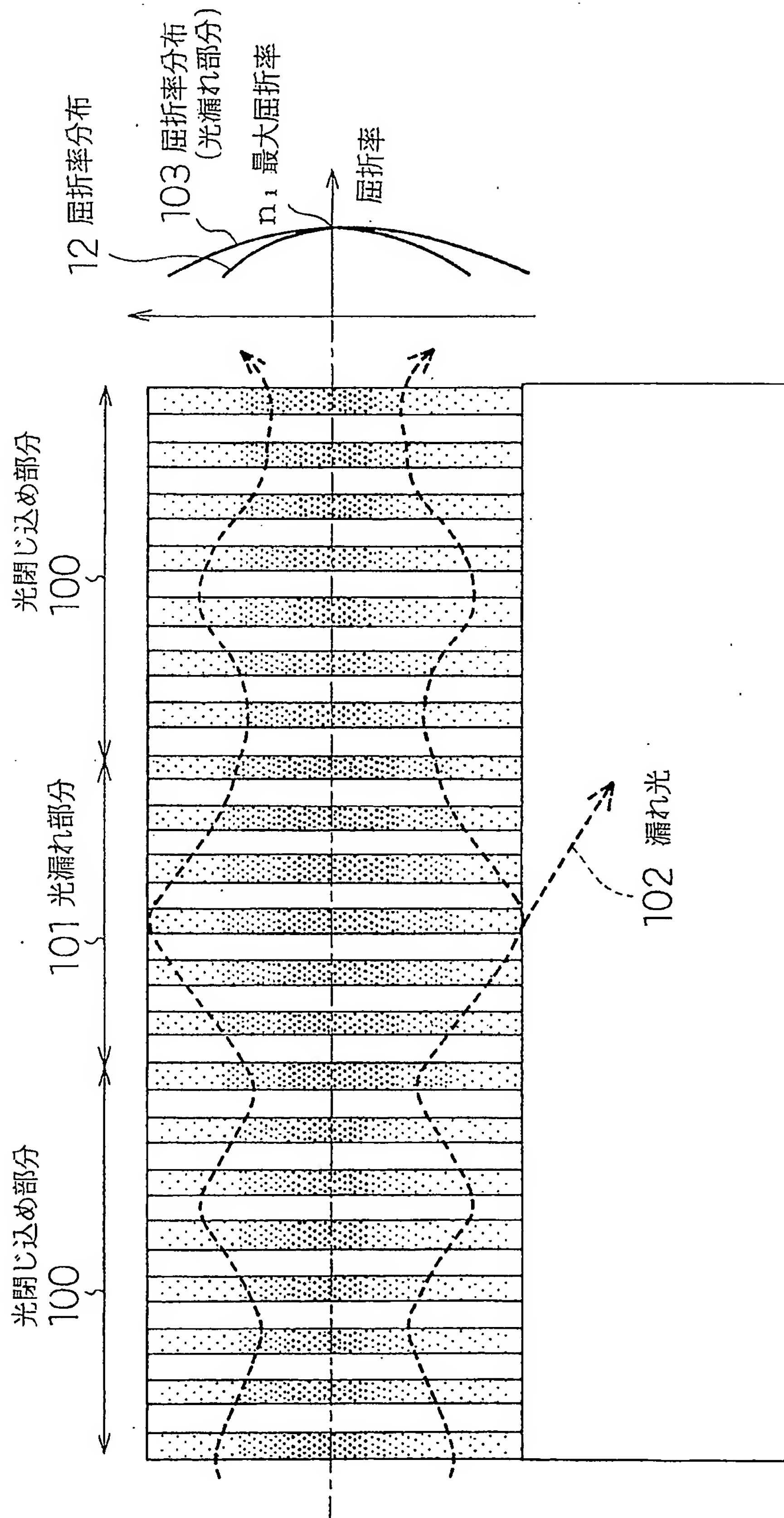
【図 8】



【図 9】

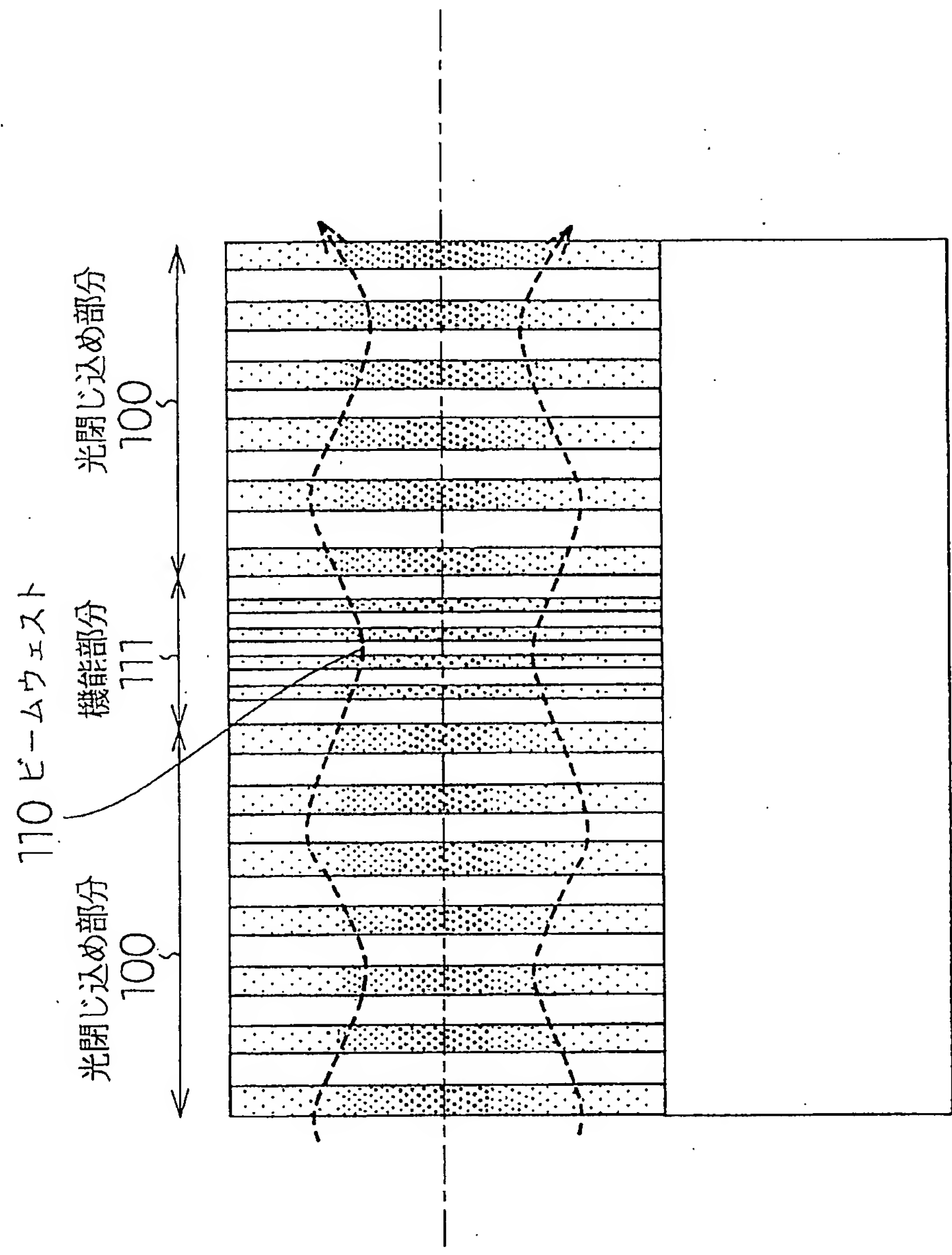


【図 10】

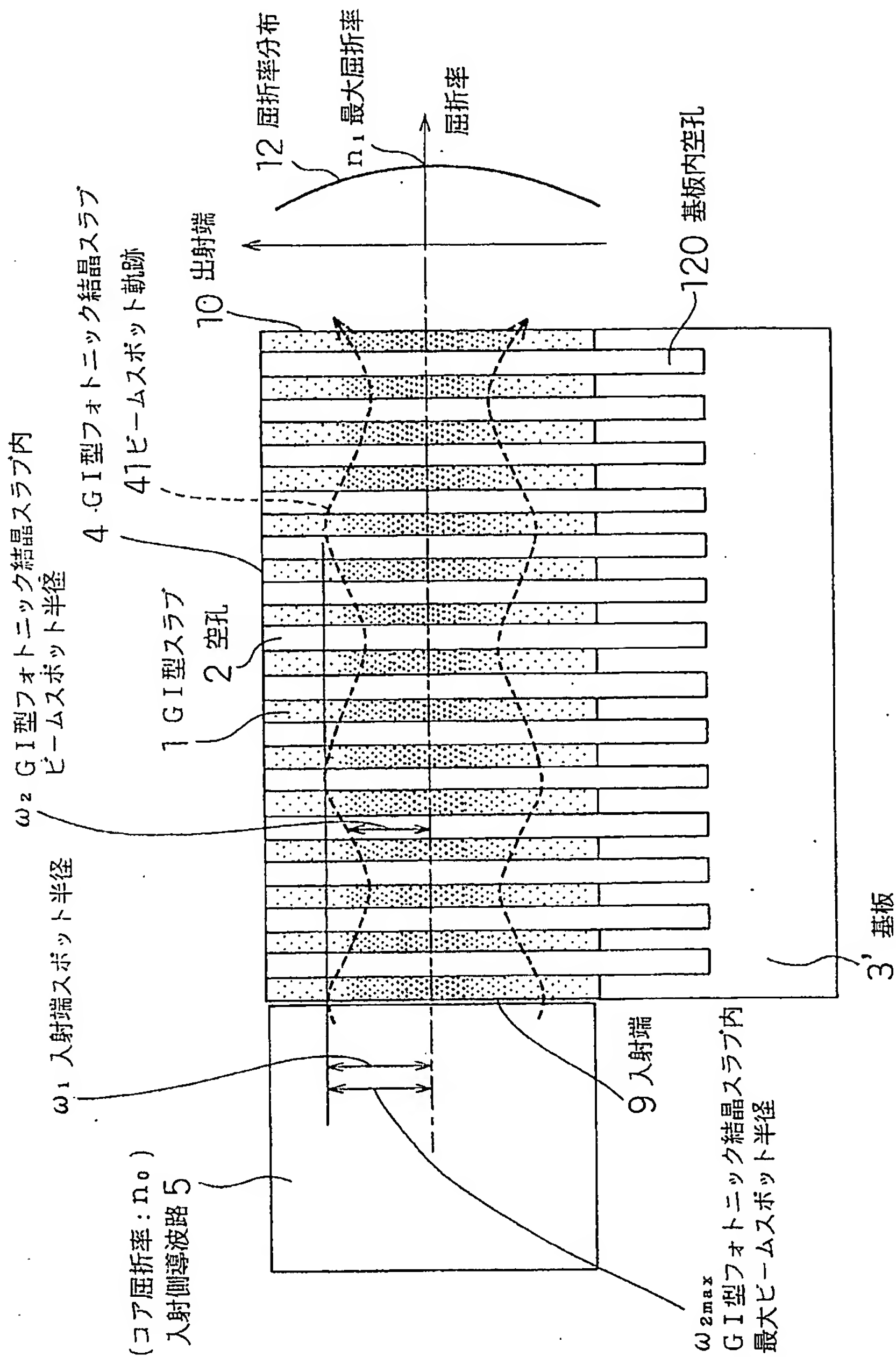




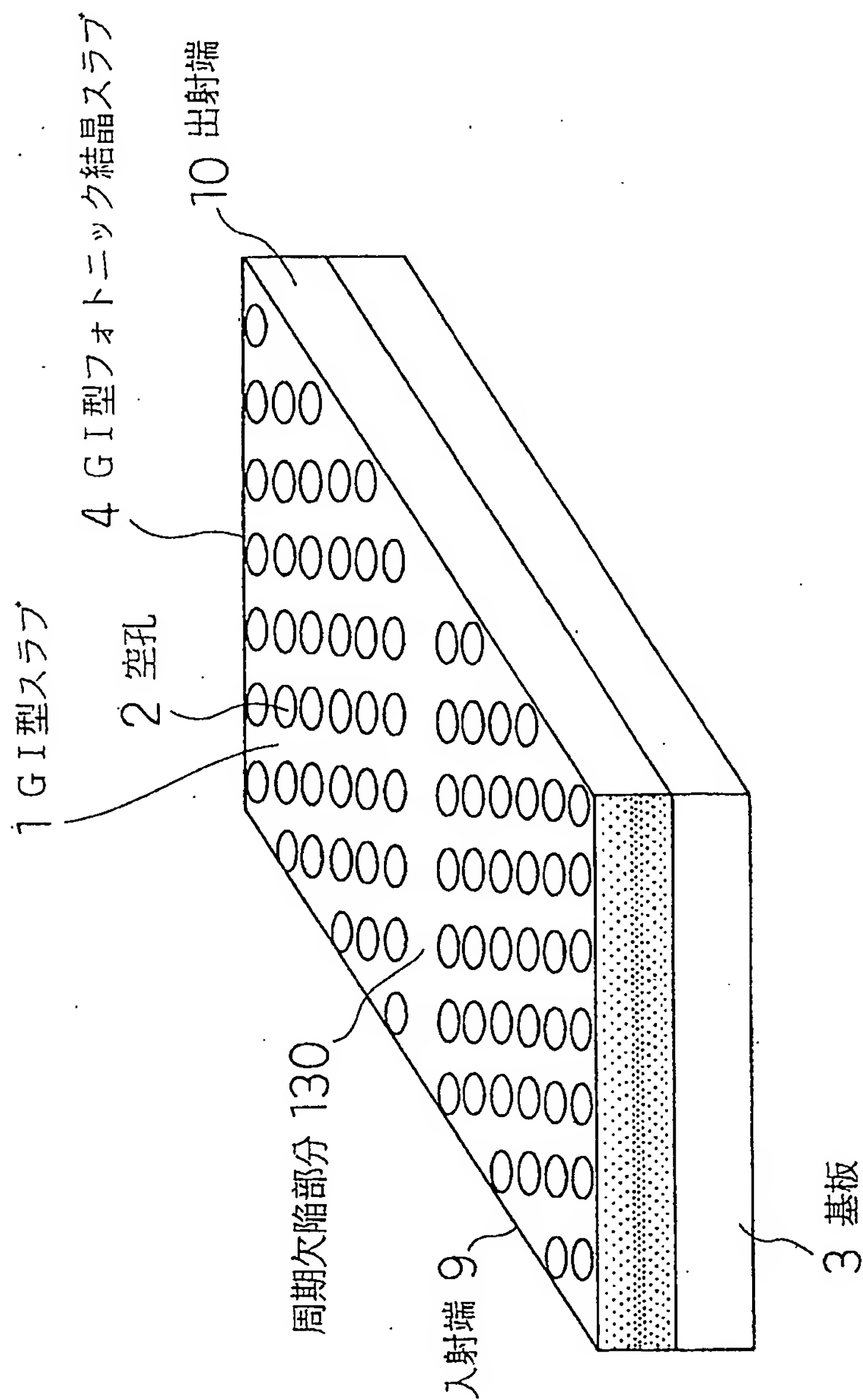
【図 11】



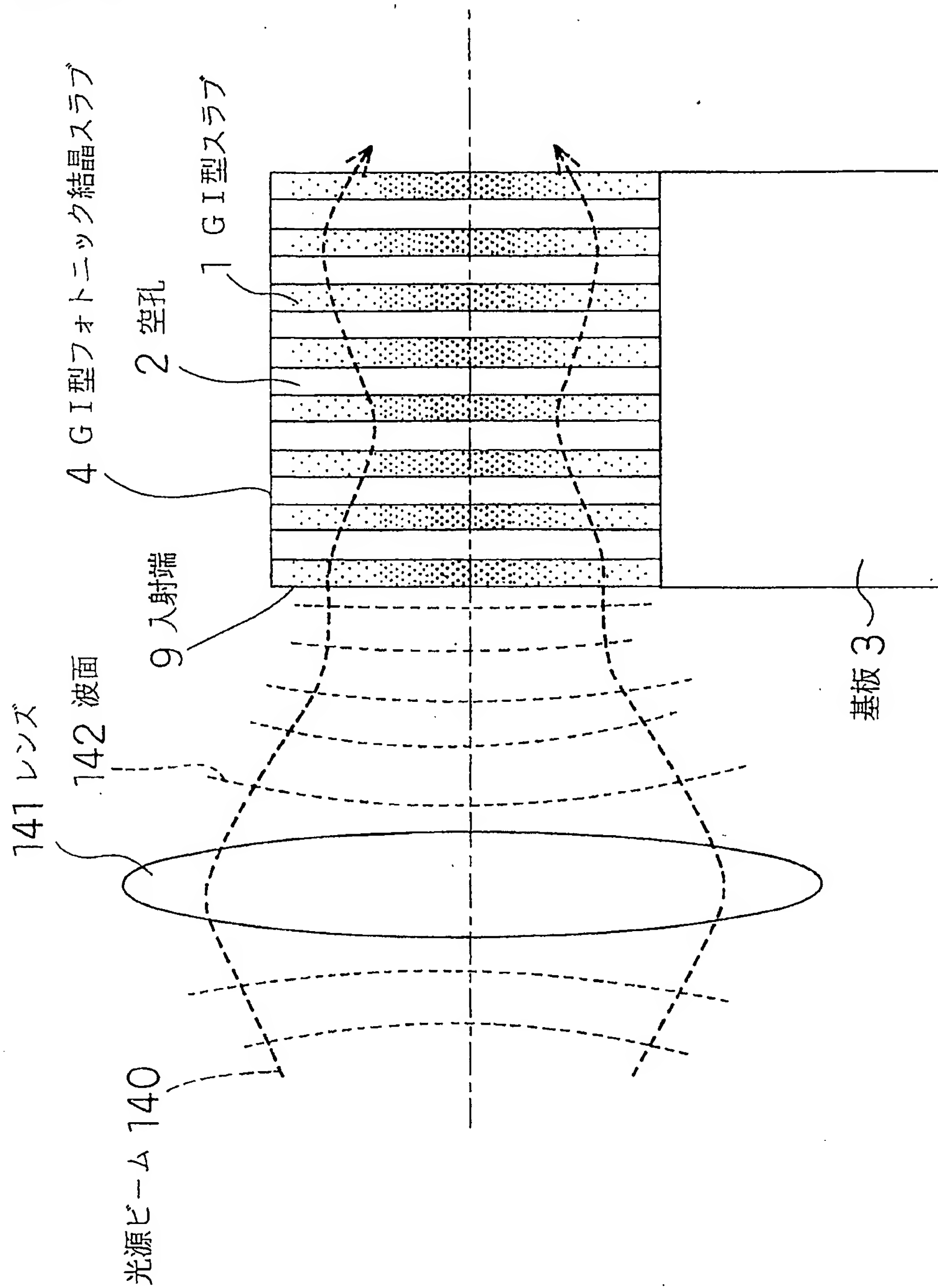
【図 12】



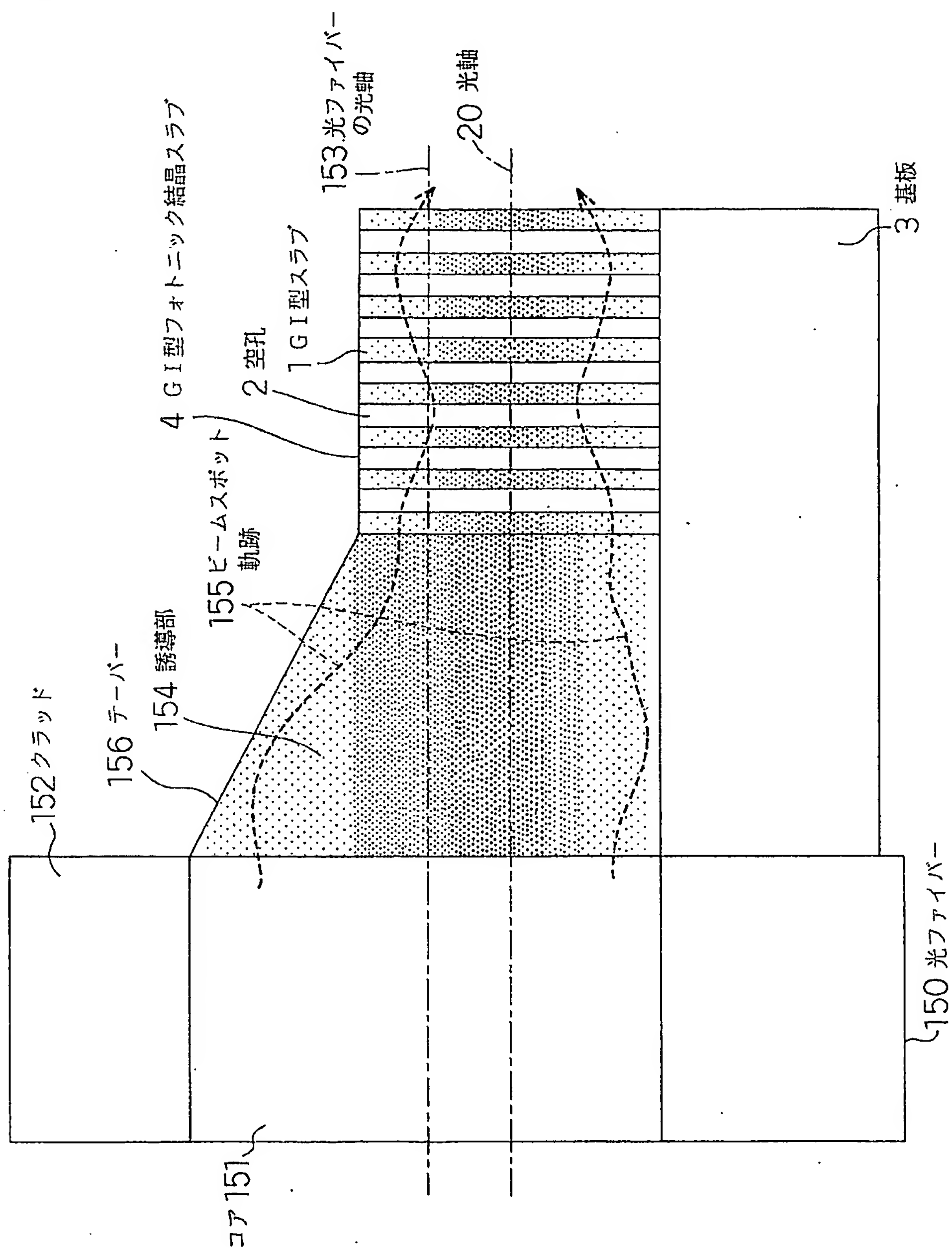
【図 13】



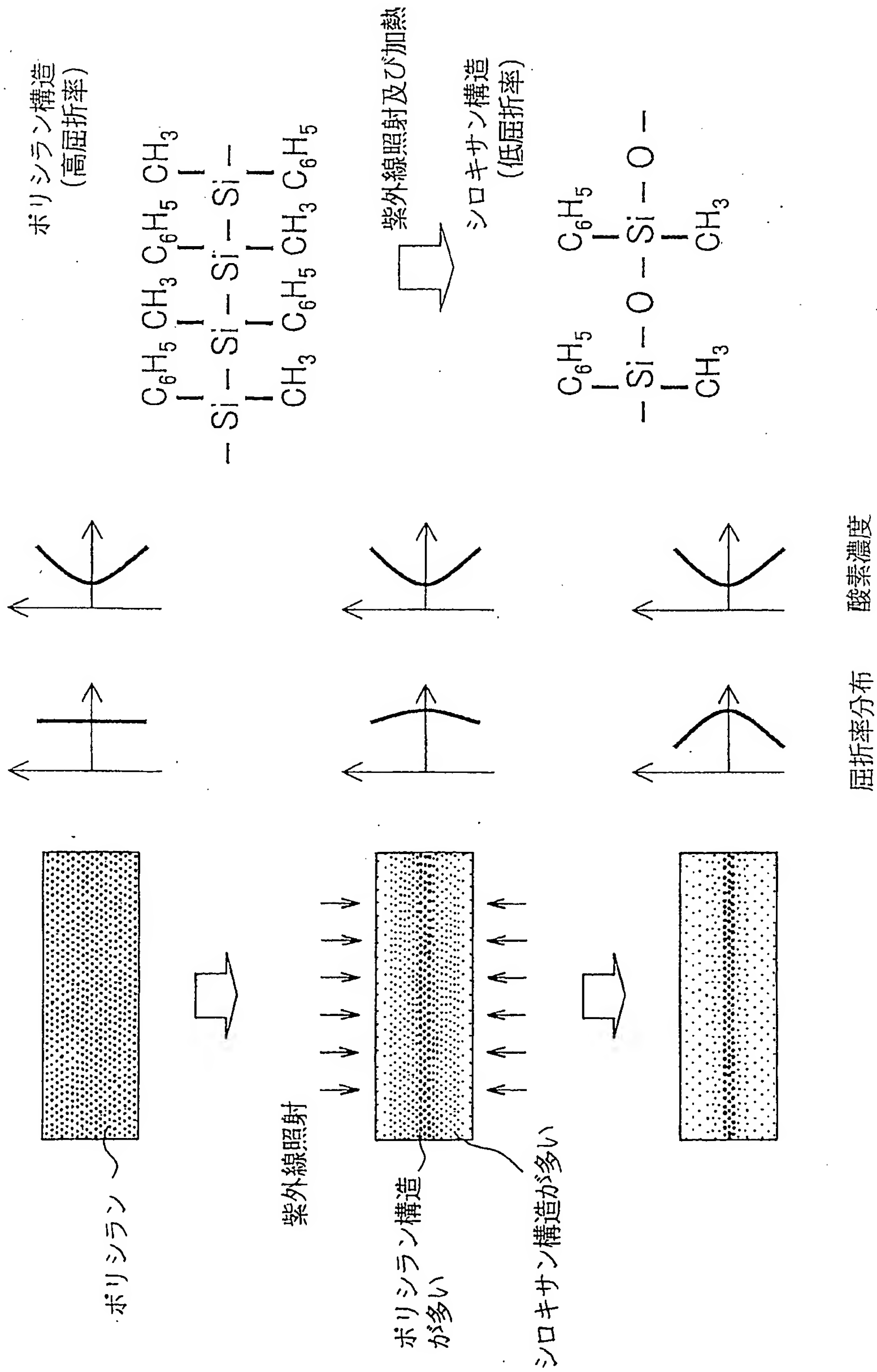
【図 14】



【図 15】

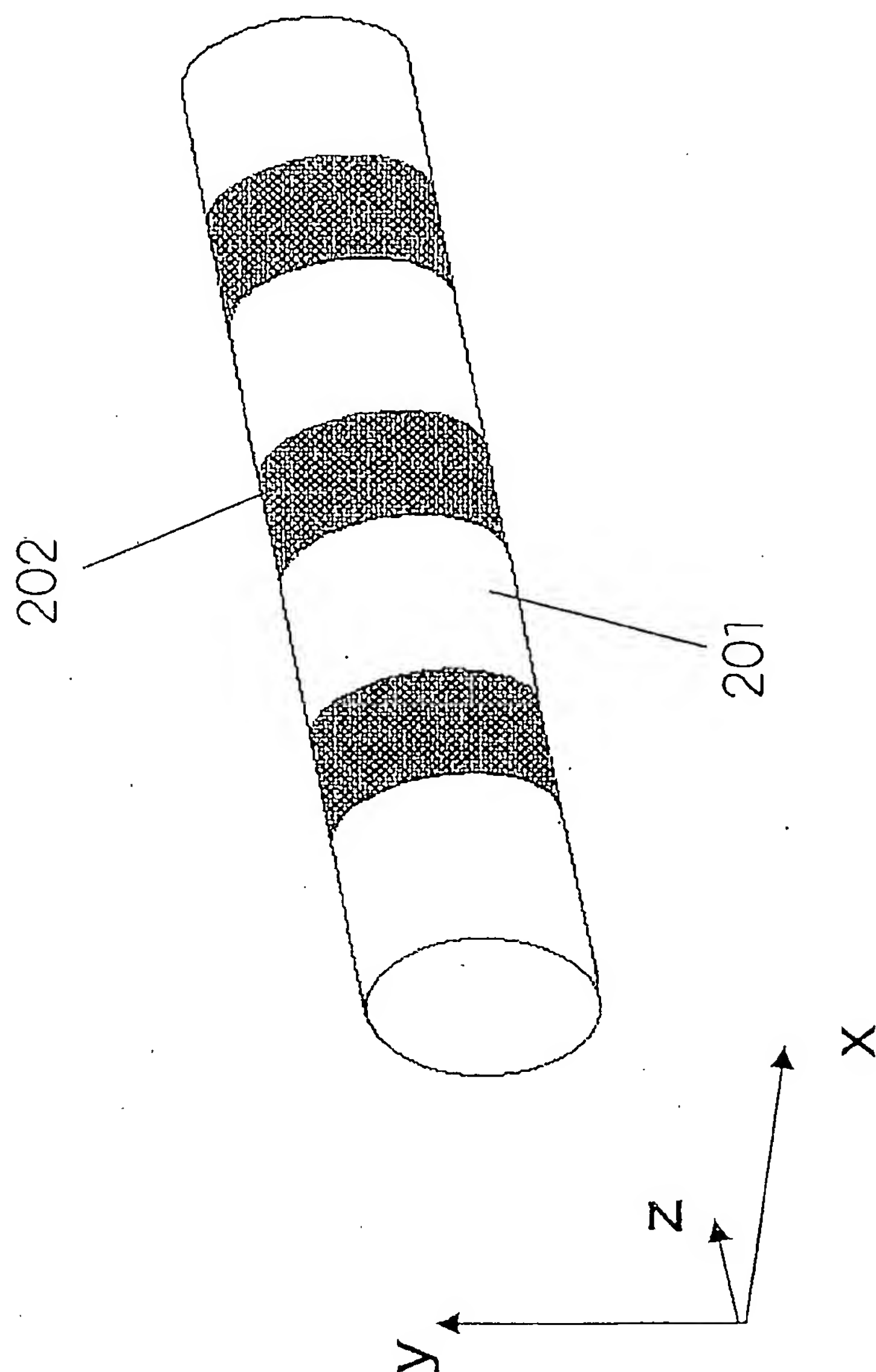


【図 16】





【図 17】



## 【書類名】 要約書

【課題】 より簡単な光学系でフォトニック結晶の周期を有さない方向に対して光を閉じ込めることが要望されていた。

【解決手段】 入射される光の光軸 20 の方向に垂直な第一の方向に関して、光軸 20 から両方向に向かって減少する屈折率分布 12 を有する第一の材料と、第一の材料の中に、第一の方向とは異なる第二の方向に関して、実質的に周期的に配置された第二の材料とを有する G I 型フォトニック結晶スラブ 4 を備え、第一の材料が有する第一の方向に関する屈折率分布 12 と、G I 型フォトニック結晶スラブ 4 が有する第一の方向に関する厚さと、入射される光の波長と、入射される光の、光が入射される G I 型フォトニック結晶スラブ 4 の入射端 9 の内側における、第一の方向に関する入射端ビームスポット半径  $\omega_1$  とは、入射される光が第一の方向に関して G I 型フォトニック結晶スラブ 4 の内部に実質上閉じ込められるように決定されている光デバイスである。

【選択図】 図 1

特願 2 0 0 4 - 0 1 4 7 4 6

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[ 0 0 0 0 0 5 8 2 1 ]

1. 変更年月日

1 9 9 0 年 8 月 2 8 日

[変更理由]

新規登録

住 所

大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地

氏 名

松下電器産業株式会社